



Российская Академия Наук

ТРУДЫ

Кольского научного центра РАН

8/2018 (9)

ЭНЕРГЕТИКА

выпуск 17

Апатиты
2018

8/2018 (9)
издается с декабря 2010 г.

УДК 621.314
ISSN 2307-5252

Российская Академия Наук

ТРУДЫ

Кольского научного центра

Главный редактор —
чл.-корр. РАН, проф. С. В. Кривовичев

Заместители главного редактора:
д. т. н. В. А. Маслобоев

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. Путилов,
д. ф.-м. н. Е. Д. Терещенко,
к. г.-м. н. А. Н. Виноградов (отв. секретарь)

ЭНЕРГЕТИКА

выпуск 17

Редколлегия серии «Энергетика»:
к.т.н. В. Н. Селиванов (отв. редактор),
к.т.н. В. А. Минин (зам. отв. редактора),
д.т.н. Н. В. Коровкин,
д.г.-м.н. А. А. Жамалетдинов,
к.т.н. А. Н. Данилин,
к.т.н. Н. М. Кузнецов

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-58457
от 25.06.2014 выдано Федеральной службой по
надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций.

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8

Научное издание

Технический редактор: В. Ю. Жиганов

Подписано к печати 12.11.2018. Формат бумаги 70×108 1/16.
Усл. печ. л. 11.03. Заказ № 31. Тираж 300 экз.
Издательство ФГБУН ФИЦ КНЦ РАН
184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14
www.naukaprint.ru

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

© Центр физико-технических проблем энергетики Севера - филиал
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра "Кольский научный
центр Российской академии наук, 2018
© ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии
наук», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Колобов В.В., Баранник М.Б., Ивонин В.В., Селиванов В.Н., Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Скороходов А.А.	Опыт применения генератора «энергия-4» для дистанционных и частотных электромагнитных зондирований в эксперименте «МУРМАН-2018»..... 7
Кузнецов Н.М., Коновалова О.Е., Победоносцева В.В.	Управление энергоэффективностью в регионах арктической зоны российской федерации..... 20
Фастий Г.П., Бурцев А.В., Ярошевич В.В.	Задача выполнения молниезащитных мероприятий на Кольском полуострове..... 35
Бурцев А. В., Фастий Г. П., Ярошевич В. В.	Информационная модель воздушной линии электропередачи для построения концепции BigData в электроэнергетике..... 43
Минин В.А.	Распределение рабочих периодов и периодов простоя ВЭУ по длительности на северном побережье Кольского полуострова..... 48
Бурцев А.В., Фастий Г. П., Ярошевич В. В.	Развитие системы мониторинга грозовой активности на Кольском полуострове..... 55
Куклин Д.В.	Оценка параметров измерительного устройства электрических характеристик грунта..... 60
Коновалова О.Е.	Энергообеспечение республики Коми и роль возобновляемой энергетики в энергосистеме..... 68
Аксенович Т. В.	Методы цифровой обработки токов в нейтрали автотрансформатора..... 79

Колобов В.В., Баранник М.Б.	Защита выхода генератора импульсов с индуктивным накопителем энергии от перенапряжений.....	85
Евстигнеев А.В., Колобов В.В.	Способы построения устройства для контроля состояния подвесных ОПН	98
Залесова О.В.	Исследование влияния грозозащитного троса на величину наведенного напряжения на отключенной ВЛ.....	102
Данилин А.Н., Климов А.А., Потокин А.С.	Расчёт оптимального соотношения конструктивных параметров разделительных соленоидов технологических ГИН.....	109
Данилин А.Н., Климов А.А.	Режимы работы группы генераторов импульсного напряжения с общей технологической нагрузкой.....	116
Ивонин В.В.	Исследование импульсных сопротивлений электродов различных типов с одинаковой площадью поверхности.....	122

Russian Academy of Sciences

8/2018 (9)

UDC 621.314
ISSN 2307-5252

TRANSACTIONS

Kola Science Centre

Editor-in-Chief — S. V. Krivovichev,
Corr. Member of the RAS, Prof.

Deputy Editors-in-Chief:
V. A. Masloboev, Dr. Sc. (Engineering)

Editorial Council:

G. G. Matishov, Acad. of the RAS,
N. N. Melnikov, Acad. of the RAS,
V. K. Zhironov, Cor. Member of the RAS,
A. N. Nikolaev, Cor. Member of the RAS,
F. D. Larichkin, Dr. Sc. (Economics),
V. P. Petrov, Dr. Sc. (Geology and Mineralogy),
V. A. Putilov, Dr. Sc. (Engineering),
E. D. Tereshchenko, Dr. Sc. (Physics and Mathematics),
A. N. Vinogradov, PhD (Geology and Mineralogy) —
Executive Secretary

ENERGY TECHNOLOGY

Series 17

Editorial Board of Energy Technology Series:
V. N. Selivanov, PhD (Eng.), Executive Editor
V. A. Minin, PhD (Eng.),
N. V. Korovkin, Dr. Sc. (Eng.),
A. A. Zhamaletdinov, Dr. Sc. (Eng.),
A. N. Danilin, PhD (Eng.),
N. M. Kuznetsov, PhD (Eng.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8

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

© Northern Energetics Research Centre, 2018
© Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 2018

CONTENTS

	Pages
Kolobov V.V., Barannik M.B., Ivonin V.V., Selivanov V.N., Zhamaletdinov A.A., Shevtsov A. N., Skorokhodov A.A.	Experience of application of the "Energy-4" generator for dc and csamt electromagnetic soundings in the "MURMAN-2018" experiment..... 7
Kuznetsov N.M., Konovalova O.E., Pobedonostseva V.V.	Management of energy efficiency in the regions of the arctic zone of the Russian federation..... 20
Fastiy G.P., Burtsev A. V., Yaroshevich V. V.	The problem of implementation of lightning protection in the Kola peninsula..... 35
Burtsev A. V., Fastiy G. P., Yaroshevich V. V.	Information model of power transmission line to construct the BigData concept in electric power industry..... 43
Minin V.A.	Distribution under duration of working periods and idle periods of wind turbines in the northern coast of the Kola peninsula..... 48
Burtsev A.V., Fastiy G. P., Yaroshevich V. V.	Development of monitoring thunderstorm activity on the Kola peninsula..... 55
Kuklin D.V.	Estimation of parameters of measurement device for electrical soil characteristics..... 60
Konovalova O.E.	The power supply of the Komi republic and the role of renewable energy in the energy system..... 68
Aksenovich T. V.	Methods of digital processing of currents in the neutral of the autotransformer..... 79

Kolobov V.V., Barannik M.B.	An overvoltage protection for the pulse generator based on inductive energy storage	85
Evstigneev A.V., Kolobov V.V.	The approaches of design the device for monitoring the state of transmission line arrester.....	98
Zalesova O.V.	Research of the overhead ground–wire cable influence on the value induced voltage in disconnected overhead power line.....	102
Danilin A.N., Klimov A.A., Potokin A.S.	The calculation of the design parameters optimal ratio for charging inductors used in technological Marx generators.....	109
Danilin A.N., Klimov A.A.	Operation modes of a high voltage pulse generators group connected to a single technological load.....	116
Ivonin V.V.	Research of impulse resistances of different types grounding electrodes with equal surface area.....	122

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.7-20
УДК 621.314:550.837

**В. В. Колобов, М. Б. Баранник, В. В. Ивонин, В. Н. Селиванов,
А. А. Жамалетдинов, А. Н. Шевцов, А. А. Скороходов**

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА «ЭНЕРГИЯ-4» ДЛЯ ДИСТАНЦИОННЫХ И ЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «МУРМАН-2018»

Аннотация

В статье описан разработанный в ЦЭС КНЦ РАН автономный генератор «Энергия-4» мощностью 29 кВт с выходным напряжением до 1200 В и рассмотрен опыт его применения для решения фундаментальной задачи изучения природы глубинных геофизических границ в толще архейской кристаллической земной коры на территории Мурманского блока в ходе эксперимента «Мурман-2018». Методика работ эксперимента основана на дистанционном принципе глубинного зондирования в комплексе с частотными и аудиоманнитотеллурическими зондированиями. В качестве контролируемого источника поля использовались две взаимно-ортогональные заземленные излучающие линии длиной 1.6 и 1.9 км, ток в которые подавался от генератора «Энергия-4». Измерения выполнены по трем трассам с максимальными удалениями от источника до 102 км в режиме частотного зондирования (в диапазоне 4–1000 Гц) и до 56 км в режиме дистанционного зондирования с глубоким накоплением. Результаты эксперимента позволили впервые в научной литературе количественно оценить положение предполагаемой по реологическим оценкам границы резкого увеличения сопротивления пород на глубине 10–15 км. Природа установленной границы (границы «непроницаемости» для гальванических токов) связывается с переходом свойств горных пород из хрупкого состояния в верхней толще земной коры к пластичному состоянию на глубинах 10–15 км и больше. В зарубежной литературе эта граница определяется как BDT-zone (brittle-ductile transition zone). В статье кратко рассмотрены структурная схема и принцип действия генератора «Энергия-4». Описана методика проведения эксперимента «Мурман-2018». Приведены примеры результатов обработки измерительных данных.

Ключевые слова:

геофизический источник тока, инвертер с широтно-импульсной модуляцией, заземленная излучающая линия, частотное зондирование, дистанционное зондирование, Мурманский блок, граница непроницаемости, хрупкая земная кора, зона хрупко-пластичного перехода

**V. V. Kolobov, M. B. Barannik, V. V. Ivonin, V. N. Selivanov,
A. A. Zhamaletdinov, A. N. Shevtsov, A. A. Skorokhodov**

EXPERIENCE OF APPLICATION OF THE "ENERGY-4" GENERATOR FOR DC AND CSAMT ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS IN THE "MURMAN-2018" EXPERIMENT

Abstract

The article describes the developed at the CEN of the KSC RAS self-powered 29 kW "Energy-4" generator with output voltage up to 1200 V and considers the experience of using the generator for the solution of fundamental problem of studying the nature of the deep geophysical boundaries in the Archaean crystalline crust of the Murmansk block in the "Murmansk-2018" experiment. The technique of the study is based on the remote principle of the deep sounding in combination with frequency and audio magnetotelluric soundings. Two mutually orthogonal grounded transmitting lines 1.6 km and 1.9 km in length powered by the "Energy-4" generator was used as a controllable source of

electromagnetic field. The measurements were performed on three directions with maximum distances from the source up to 102 km in the mode of frequency sounding (in the range of 4–1000 Hz) and up to 56 km in the mode of remote sensing with deep accumulation. The results of the experiment made it possible for the first time in the scientific literature to quantify the position of the boundary of a sharp increase of rocks resistivity at a depth of 10–15 km estimated earlier qualitatively on the base of rheological estimates. The nature of the established boundary (the boundary of "impermeability" for galvanic currents) is associated with the transition zone of rock properties from a brittle state in the upper crust to the plastic state at depths of 10–15 km and more. In foreign literature, this boundary is defined as the BDT-zone (brittle-ductile transition zone). Block diagram description and operation principle of the "Energy-4" generator are briefly given in the paper. The methodology of the "Murman-2018" experiment is described. Examples of the measurement data processing results are presented.

Keywords:

geophysical current source, pulse width modulation inverter, grounded transmitting line, frequency sounding, remote sensing, Murmansk block, impermeability boundary, brittle earth crust, brittle-ductile transition zone

Введение

Эксперимент «Мурман-2018» по глубинному электромагнитному зондированию с использованием контролируемых источников поля в комплексе с аудиоманнитотеллурическими зондированиями (АМТЗ) проведен в июне 2018 года на территории Мурманского блока. Главной целью эксперимента «Мурман-2018» явилось изучение предполагаемой границы резкого увеличения удельного электрического сопротивления пород на глубине около 10-15 км, т.н. границы «непроницаемости» (VIP-zone, boundary of impermeability), с которой связывается положение области перехода от верхней, хрупкой части земной коры (brittle zone), к нижней, пластичной части (ductile zone). При индукционных зондированиях в условиях дальней (волновой) зоны, в частности при магнитотеллурическом зондировании (МТЗ), слои высокого сопротивления, если их мощность меньше длины электромагнитной волны в земле, попадают в область «прозрачности» и их обнаружение становится проблематичным [1]. Поэтому, в эксперименте «Мурман-2018» основные исследования выполнены с применением метода дистанционного зондирования на постоянном токе, путем накопления периодических прямоугольных разнополярных сигналов в форме меандра (DC-зондирование). Важной задачей эксперимента «Мурман-2018» явилась также проверка результатов глубинных зондирований, выполненных на территории Мурманского блока в предыдущие годы разными организациями, в том числе и Геологическим институтом КНЦ РАН.

Аппаратура и методика эксперимента

Эксперимент «Мурман-2018» выполнен на территории Мурманского блока. Положение Мурманского блока показано на рис. 1 на геологической карте Ф. П. Митрофанова [2]. Мурманский блок представляет собой монотонную в геологическом отношении провинцию, сложенную древнейшими гранитогнейсовыми породами нижнеархейского возраста [3].

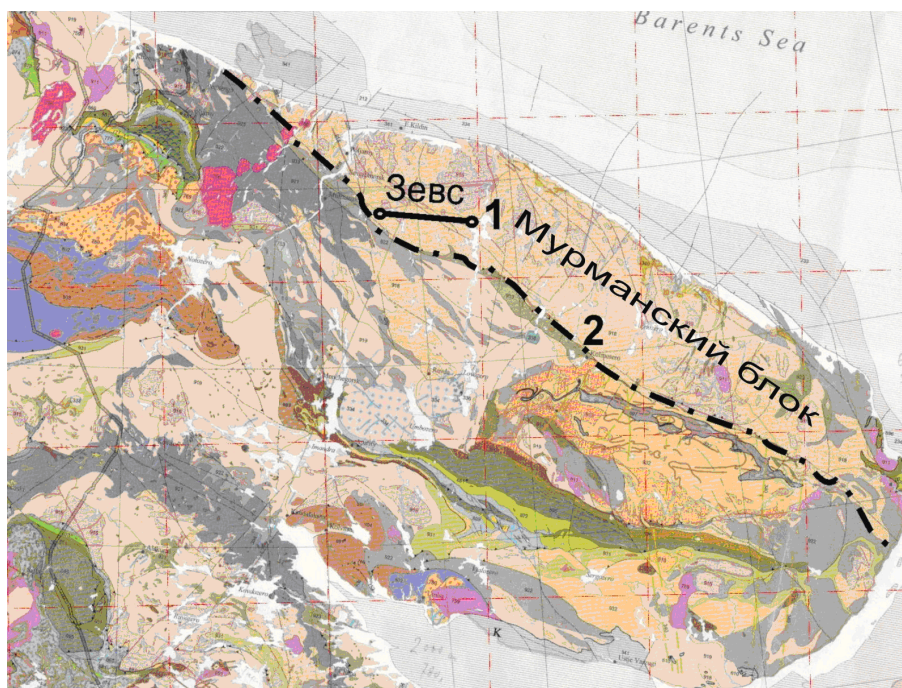


Рис. 1. Положение Мурманского блока на геологической карте Кольского п-ова [2]:
1 — СНЧ-антенна «Зевс»; 2 — юго-западная граница Мурманского блока

Fig. 1. The location of the Murmansk block on the geological map of the Kola Peninsula [2]: 1 — the VLF-antenna of the “Zeus” system;
2 — the south-western boundary of the Murmansk block

Территория Мурманского блока отличается практически полным отсутствием рудоперспективных проводящих объектов и в среднем высоким электрическим сопротивлением в десятки тысяч Ом·метров. Именно эта его особенность привлекла внимание связистов при выборе территории для размещения радиопередающей антенны сверхнизкочастотного (СНЧ) излучения «Зевс» (рис. 1). Однородное высокое сопротивление пород Мурманского блока явилось также благоприятным фактором для постановки на его территории эксперимента «Мурман-2018» по глубинному электромагнитному зондированию с целью изучения «нормального» геоэлектрического разреза и исследования положения глубинных геофизических границ. Схема расположения питающих линий и приемных точек (пунктов) зондирований эксперимента «Мурман-2018» приведена на рис. 2.

Исследования проводились с использованием дистанционного и индукционного принципов глубинного зондирования. В качестве источника тока использовался автономный генератор «Энергия-4» мощностью 29 кВт [4], а в качестве источников контролируемого поля — две взаимно ортогональные заземленные излучающие линии (диполи) АВ1 и АВ2 длиной ~1.9 км и ~1.6 км, соответственно. Положение питающих линий в укрупненном масштабе приведено на рис. 26. В линиях формировались прямоугольные разнополярные сигналы в форме меандра с периодом 0.25 с.

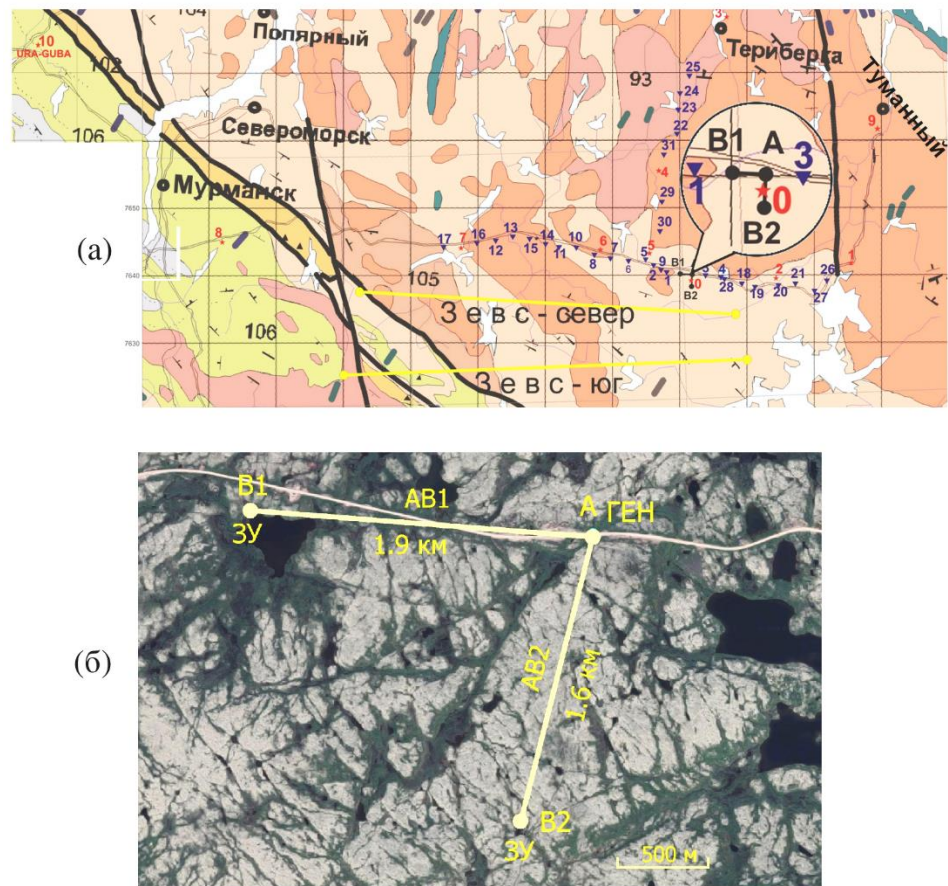


Рис. 2. Схема расположения питающих линий (AB1, AB2) и точек (пунктов) наблюдений при проведении эксперимента «Мурман-2018»: А — точка размещения генератора «Энергия-4»; 0-10 — пункты CSAMT зондирования; 1-31 — пункты DC-зондирования; ЗУ — заземляющее устройство излучающей линии; ГЕН — генератор «Энергия-4»

Fig. 2. The locations of the transmitting lines (AB1, AB2) and measuring points in the “Murman-2018” experiment: A — is the “Energy-4” generator location; 0-10 — are the measuring points of CSAMT soundings; 1-31 — are the measuring points of DC soundings; GD — the transmitting line grounding device; GEN – the “Energy-4” generator

Геофизический генератор «Энергия-4», разработанный ЦЭС КИЦ РАН в 2014 году, предназначен для электромагнитных зондирований в аудиодиапазоне частот — от 4 до 2000 Гц. Ранее генератор использовался при проведении эксперимента по изучению параметров слоя дилатантно-диффузионной природы проводимости в архейском кристаллическом основании Балтийского щита — эксперимент «Ковдор-2015» [5]. За счет применения в инверторе генератора режима широтно-импульсной модуляции (ШИМ), в излучающей линии может быть сформирован периодический ток любой необходимой для зондирования формы (синус, меандр и т.д.).

Структурная схема генератора «Энергия-4» приведена на рисунке 3. Основной силовой блок установки — ШИМ-инвертор — питается от двух генераторов постоянного тока (ГПТ-1, ГПТ-2 на рис. 3) с выходным напряжением до 600 В, установленных на валу двигателя автомашины ЗИЛ-131, в кунге которой смонтированы блоки генератора «Энергия-4». Соответственно, выходная мощность генератора ограничена суммарной мощностью питающих ГПТ — 29 кВт.

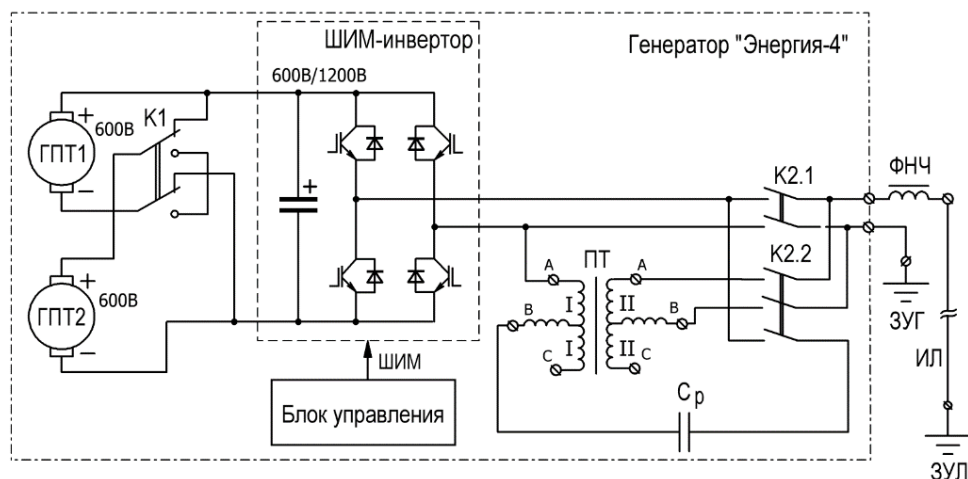


Рис. 3. Структурная схема генератора «Энергия-4»:

ГПТ-1, ГПТ-2 — генераторы постоянного тока;

ПТ — повышающий трансформатор;

Ср — разделительный конденсатор; ФНЧ — фильтр нижних частот (дрессель);

ЗУГ — заземляющее устройство генератора; ИЛ — излучающая линия;

ЗУЛ — заземляющее устройство линии

Fig. 3. The block diagram of the “Energy-4” generator:

DCG-1, DCG-2 — the direct current generators; ST — the step-up transformer;

CHF — the filtering choke; GGD — the generator grounding device;

TL — a transmitting line; TLGD — the transmitting line grounding device

На частотах генерации ниже 50 Гц выход инвертора с помощью коммутатора К2 напрямую подключается к заземленной излучающей линии (ИЛ на рис. 3). При этом ГПТ-1 и ГПТ-2 с помощью коммутатора К1 соединяются последовательно, что теоретически позволяет обеспечить на звене постоянного тока инвертора напряжение до 1200 В. На практике, для предотвращения пробоя изоляции инвертора, рассчитанной на напряжение до 1000 В [6, 7], амплитуду напряжения на звене постоянного тока ограничивают до этого значения за счет регулировки оборотов приводящего двигателя ГПТ [4].

При работе генератора «Энергия-4» на частотах выше 50 Гц выход инвертора с помощью К2 подключается к первичной обмотке повышающего трансформатора (ПТ на рис. 3) от генератора «Энергия-2» [6, 7]. Вторичная обмотка ПТ оказывается включенной между заземлением генератора и излучающей линией. При этом, для предотвращения превышения рабочего напряжения изоляции трансформатора, генераторы постоянного тока соединяются параллельно. Соответственно,

максимальные амплитудные значения напряжений на первичной и вторичной обмотках ПТ составляют 600 В и 1200 В.

Таким образом, максимальная амплитуда выходного напряжения генератора «Энергия-4» в диапазоне частот 2-49 Гц составляет 1000 В, а в диапазоне 50-2000 Гц — 1200 В.

Подробно функциональная схема, принцип действия, силовая элементная база генератора, а также оригинальные схемотехнические решения, использованные при его проектировании, рассмотрены в работе [4].

Суммарное сопротивление провода и заземлителя для линии АВ1 составляло 35 Ом ($R_{AB1}=35$ Ом), а для линии АВ2 — 37 Ом ($R_{AB2}=37$ Ом). Сопротивление заземляющего устройства выхода генератора: $R_{зуг}=20$ Ом. Таким образом, суммарное активное сопротивление излучающего контура при зондировании с линией АВ1 ($R_{AB1\Sigma}=R_{AB1}+R_{зуг}$) составило 55 Ом, при зондировании с линией АВ2 — $R_{AB2\Sigma}=R_{AB2}+R_{зуг}=57$ Ом.

Пример записи амплитудных значений силы тока в линиях при проведении зондирования на разных частотах приведен в таблице 1, а типовые зависимости амплитудного значения силы тока в излучающих линиях АВ1 и АВ2 от частоты генерации приведены на рис. 4. Увеличение силы тока на частотах выше 50 Гц связано с подключением к выходу инвертора повышающего трансформатора, как было описано выше.

Таблица 1

Амплитудные значения силы тока в излучающих линиях
на различных частотах генерации

Table 1

The transmitting lines current amplitudes at the different generation frequencies

Частота, Гц	Амплитудное значение силы тока в излучающей линии, А	
	субширотная линия АВ1	субмеридиональная линия АВ2
0.382	8.4	8.4
3.822	8.2	8.5
9.422	8.1	8.5
19.422	8.2	8.5
38.22	8.3	8.5
64.22	20.0	20.0
94.22	17.5	19.5
123.8	17.5	18.0
194.2	17.5	17.5
287.4	17.5	17.2
416.7	17.5	18.0
588.3	17.8	19.0
833.3	17.5	18.0
1238	12.0	12.0
1667	12.0	12.0
2185	12.0	12.0

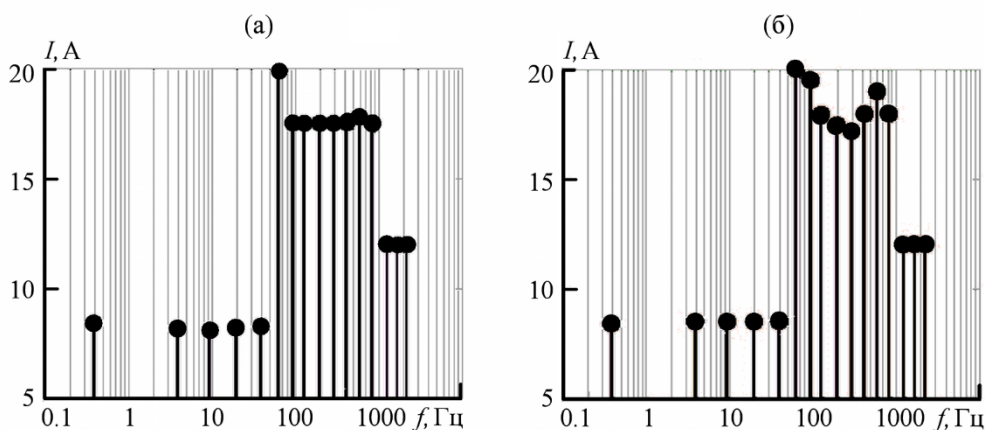


Рис. 4. Типовые зависимости амплитудного значения силы тока в излучающих линиях АВ1 (а) и АВ2 (б) от частоты генерации при проведении зондирований в ходе эксперимента «Мурман-2018»

Fig. 4 Typical dependences of amplitude value of current in the transmitting lines AB1 (a) and AB2 (b) on generation frequency during soundings at the “Murman-2018” experiment

Дистанционные зондирования

Дистанционное зондирование осуществлялось путем линейного наращивания расстояния между источником и приемником поля со средним шагом 5 км в интервале разносов от 5 до 56 км. Измерения в каждой точке зондирования проводились при субширотном (продольном, осевом) и субэкваториальном (поперечном) расположении питающих линий АВ1 и АВ2 относительно трассы зондирования. Обработка результатов дистанционного зондирования выполнялась в режиме накопления. С этой целью генерация тока и измерения проводились сеансами длительностью по 20 минут. В этом случае число накопленных полупериодов $n=2400$ и, следовательно, естественные шумы (в случае равномерного, «белого» шума) подавлялись как \sqrt{n} — примерно в 50 раз. Это соответствует эквивалентному увеличению силы тока в излучающей линии с 20 А до примерно 1000 А после процесса накопления.

Начальным этапом дистанционных зондирований являлось проведение вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) на постоянном токе в районе расположения питающих линий АВ1 и АВ2 с разносами АВ/2 до 700 м. Измерения проводились аппаратурой АНЧ-3 [8]. Положение измерительных трасс ДС-зондирований и результаты ВЭЗ на малых разносах приведены на рис. 5а. Зондирования выполнены по трем трассам — ВЭЗ-1, ВЭЗ-2, ВЭЗ-3 на рис. 5а.

Как видно из рисунка, кривые кажущегося сопротивления по всем трем трассам практически совпадают. Средний разброс значений Рока не превышает 5–8 %. Это свидетельствует о высокой горизонтальной однородности верхней части разреза в районе расположения излучающих линий. Общий вид кривой ВЭЗ и значения Рока практически совпадают с данными, измеренными А. В. Яковлевым 30 лет назад [9] в центральной части источника «Зевс». Это указывает на высокое, в среднем, однородное сопротивление Мурманского блока.

Дистанционные зондирования выполнены по трем лучам, показанным на рис. 5а, — на Мурманск, на Териберку и на п. Туманный и далее на Малые Зеленцы. Пример результатов зондирований по трассе в направлении на Мурманск приведен на рис. 5б.

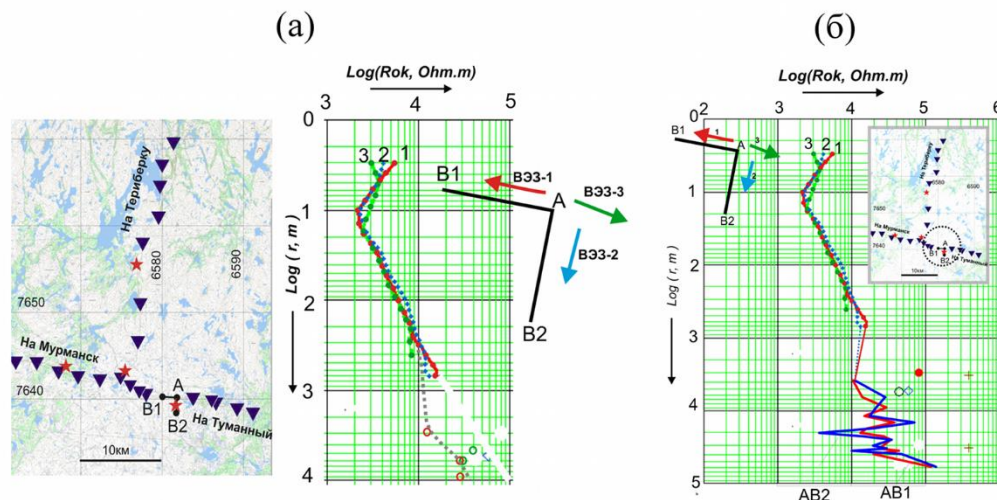


Рис. 5. Результаты вертикальных электрических зондирований на малых разносах вдоль расположения питающих линий (а) и результаты дистанционных зондирований в направлении на Мурманск (б)

Fig. 5. The results of the vertical electrical sounding for short separation distances from the transmitting lines (a) and the results of the DC soundings in the direction of Murmansk (б)

Анализируя результаты DC-зондирований по всем трем направлениям, можно отметить, что результаты зондирований на Мурманск и п. Туманный имеют общие особенности.

Прежде всего, обращает внимание изрезанность кривых Рока на больших разносах, контрастирующая с плавным, градиентным характером кривых на малых разносах.

При зондировании в направлении Мурманска значения Рока на разносах до 30–40 км варьируются в районе 20–30 тысяч омметров. При дальнейшем увеличении разносов значения Рока резко возрастают до 150 тысяч омметров. В направлении на Туманный такое резкое возрастание значений Рока наблюдается уже на разносе от 26 км.

Зависимости изменения значений Рока с увеличением рабочих разносов для всех трех трасс DC-зондирований приведены на рис. 6, где кривые зондирования приведены в линейно-логарифмическом масштабе. Как видно из рисунка, из общей тенденции выбиваются результаты зондирования по трассе на п. Териберка — на больших разносах значения Рока резко опускаются до значений 10^3 Ом·м., что объясняется влиянием прибрежных осолоненных осадков.

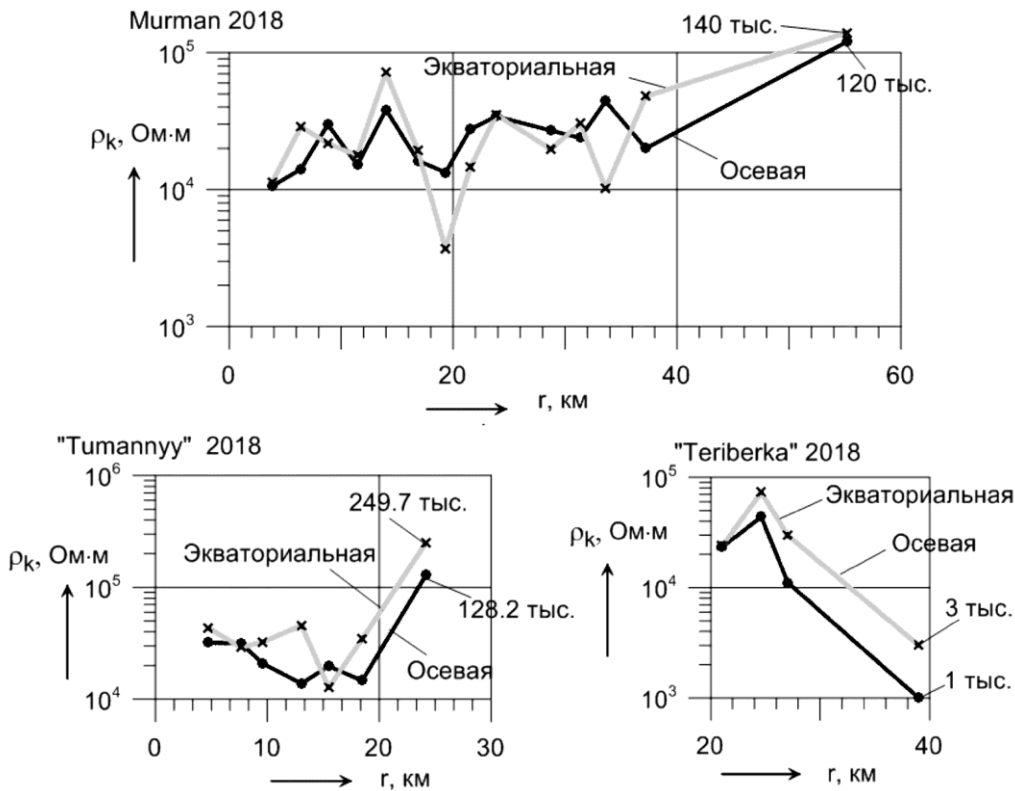


Рис. 6. Пример обработки результатов дистанционного зондирования на постоянном токе в линейно-логарифмическом масштабе

Fig. 6. An example of processing the results of DC soundings depicted in a linear logarithmic scale

Частотные АМТ зондирования в комплексе с АМТЗ

Результаты проведенных частотных зондирований с контролируемым источником (the controlled-source audio-frequency magnetotelluric (CSAMT) soundings), пример которых приведен на рис. 7, в целом подтверждают результаты, полученные при дистанционных зондированиях.

Кривые Рока имеют классический вид, согласный с теоретическими расчетами [10]. Их поведение указывает на то, что условия квазистационарного приближения нарушаются уже на частотах в сотни герц. На частотах ниже 300–500 Гц кривые зондирования по электрическому полю выходят на постоянные значения, кривые зондирования по полному входному импедансу воздымаются вверх по шкале сопротивления, а кривые по полному магнитному полю, наоборот, приобретают нисходящий вид.

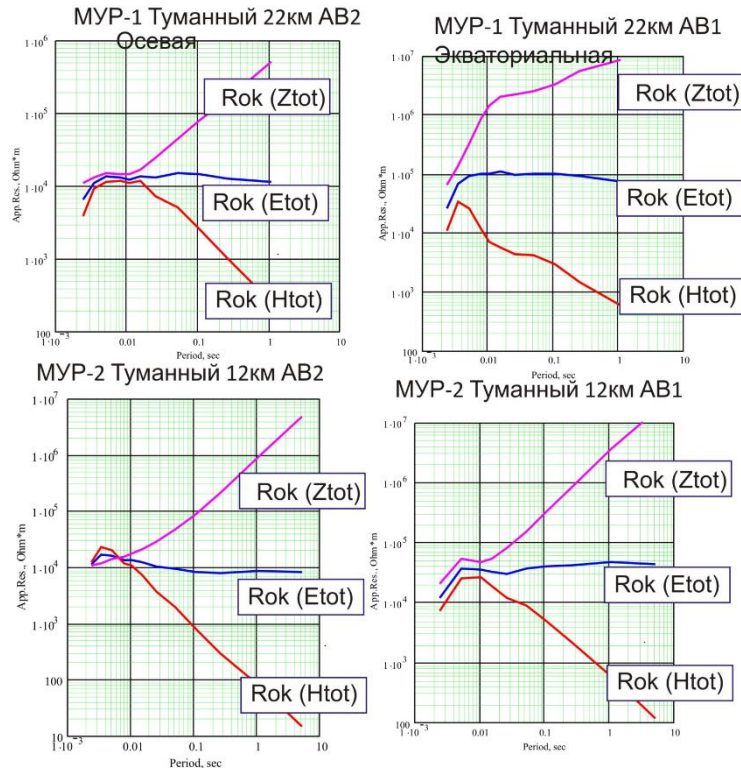


Рис. 7. Пример CSAMT зондирований на восточном профиле в направлении на п. Туманный

Fig. 7. An example of the CSAMT soundings on the eastern profile in the direction of the Tumanny settlement

Выводы

На территории Мурманского блока проведен эксперимент «Мурман-2018» по глубинному электромагнитному зондированию с использованием контролируемых источников поля в комплексе с аудиоманнителлурическими зондированиями.

В качестве источника тока в двух ортогональных заземленных излучающих линиях длиной 1.9 и 1.6 км использовался разработанный в ЦЭС КНЦ РАН автономный генератор «Энергия-4» мощностью 29 кВт с выходным напряжением до 1200 В, позволяющий проводить зондирования в диапазоне частот от 0.1 Гц до 2000 Гц. Генератор «Энергия-4» обеспечил в излучающих контурах с сопротивлением 55-57 Ом силу тока 10–20 А, в зависимости от частоты генерации, что, совместно с алгоритмами накопления и обработки измерительной информации, позволило в ходе эксперимента успешно выполнить наблюдения на удалении до 110 км от источника поля.

Основным методом исследований, использованным в эксперименте «Муриан-2018», являлось дистанционное зондирование на постоянном токе (DC-зондирование) с помощью периодических прямоугольных разнополярных сигналов тока.

Геологические результаты эксперимента «Мурман-2018» позволяют обосновать возможность существования в континентальной земной коре геофизической границы между относительно хорошо проводящей верхней частью земной коры со средним сопротивлением $(2-3) \cdot 10^4$ Ом·м и плохо проводящего, более плотного основания на глубине 10–15 км. Эта граница может знаменовать собой переходную зону между верхней, хрупкой частью земной коры («brittle zone») и нижней, пластичной частью («ductile zone») и определяется условно как граница «непроницаемости» для гальванических токов, используемых при зондированиях на постоянном токе.

Результаты эксперимента «Мурман-2018» позволяют сделать вывод о том, что граница между хрупким и пластичным состояниями вещества земной коры (граница BDT, brittle-ductile transmission zone), оцениваемая качественно по реологическим расчетам [11, 12], получила впервые в мировой литературе количественную оценку по данным геоэлектрики в виде границы резкого увеличения кажущегося сопротивления на кривых дистанционного зондирования на глубине порядка 10–15 км (граница «непроницаемости» для гальванических токов). Для получения более надежных сведений о параметрах границы BDT необходимо проведение дополнительных исследований, путем проведения глубинных дистанционных и частотных зондирований повышенной точности в поле контролируемых источников.

Кроме того, в ходе эксперимента «Мурман-2018» проведена проверка противоречивых результатов глубинных зондирований, выполненных ранее разными организациями, в том числе и ГИ КНЦ РАН. Основные выводы ревизионных работ эксперимента «Мурман-2018» сводятся к следующему:

1. С высокой степенью достоверности по результатам дистанционных и индукционных зондирований в эксперименте «Мурман-2018» установлено, что промежуточного проводящего слоя на глубине 10 км с продольной проводимостью в десятки сименсов, обнаруженного ранее на территории Мурманского блока по магнитотеллурическим данным [13], не существует. Ошибочность полученного результата объясняется тем, что интерпретация МТ данных в работе [13] выполнена по минимальным кривым МТЗ, для Е-поляризации, обладающей повышенной чувствительностью к обнаружению фиктивных проводящих слоев на глубине;

2. Не нашел подтверждения в эксперименте «Мурман-2018» разлом на территории Мурманского блока с крайне низким удельным электрическим сопротивлением в 1 Ом·м, описанный в работе [14] по результатам инфранизкочастотного зондирования. Можно предположить, что поводом для обнаружения фиктивного эффекта проводящего разлома явилось влияние высоковольтной ЛЭП Л-401 «Кола-Серебрянская ГЭС», вдоль которой проводились наблюдения в работе [14];

3. В ходе эксперимента «Мурман-2018» не удалось подтвердить наличие резкого понижения кажущегося электрического сопротивления до 10^3 Ом·м в районе Чудзъяврского разлома. Понижение сопротивления было установлено в работе [15] по данным частотного зондирования на удалении 39 км от источника. Неудача может быть объяснена, с одной стороны, редким шагом дистанционного зондирования в эксперименте «Мурман-2018» (5 км) и, с другой стороны, малой мощностью разлома (первые сотни метров) и невысокой его продольной проводимостью (десятые доли сименсов).

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, тема ГИ КНЦ РАН № 0231-2016-0001 (измерение и обработка сигналов), тема ЦЭС КНЦ РАН № 0226-2016-0002 (проектно-конструкторские работы и генерация сигналов), тема СПбФ ИЗМИРАН № ГР 01201356398 (интерпретация) и при финансовой поддержке РФФИ, проект № 018-05-00528 А (экспедиция).

Авторы выражают благодарность сотрудникам ГИ КНЦ РАН Т. Г. Коротковой за помощь в обработке сигналов и В.Е. Колесникову за помощь в топографической привязке данных и ее оформление.

Литература

1. Ваньян Л. Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 218 с.
2. Геологическая карта Кольского региона (северо-восточная часть Балтийского щита) масштаба 1:500000 / Гл. ред. Ф. П. Митрофанов. Апатиты, ГИ КНЦ РАН, 1996.
3. Батиева И. Д., Бельков И. В., Ветрин В. Р., Виноградов А. Н., Виноградова Г. В., Дубровский М. И. Гранитоидные формации докембрия северо-восточной части Балтийского щита. Л.: Наука, 1978. 264 с.
4. Колобов В. В., Баранник М. Б., Ефимов М. Б., Жамалетдинов А. А., Шевцов А. Н., Копытенко Ю. А. Генератор «Энергия-4» для мониторинга сейсмоактивных зон и электромагнитного зондирования земной коры: Опыт применения в эксперименте «Ковдор-2015» // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53, № 3. С.55-73. DOI: 10.21455/si2017.3-5
5. Жамалетдинов А. А., Велихов Е. П., Колобов В. В., Колесников В. Е., Скороходов А. А., Короткова Т. Г., Рязанцев П. А., Бируля М. А. Эксперимент «Ковдор-2015» по изучению параметров слоя дилатантно-диффузионной природы проводимости в архейском кристаллическом основании Балтийского щита // Доклады Академии наук. 2017. Т. 474, № 4. С. 477–482. DOI: 10.7868/S086956521704017X
6. Баранник М. Б., Данилин А. Н., Ефимов Б. В., Колобов В. В., Прокопчук П. И., Селиванов В. Н., Шевцов А. Н., Копытенко Ю. А., Жамалетдинов А. А. Высоковольтный силовой инвертор генератора «Энергия-2» для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 2. С. 5–23.
7. Колобов В. В., Баранник М. Б., Жамалетдинов А. А. Генераторно-измерительный комплекс «Энергия» для электромагнитного зондирования литосферы и мониторинга сейсмоактивных зон. СПб: «СОЛО», 2013. 240 с.
8. Бобровников Л. З., Кадыров И. Н., Попов В. А. Электроразведочная аппаратура и оборудование. М.: Недра, 1979. 336 с.
9. Яковлев А.В. Электрический разрез верхней части кристаллического фундамента. // Строение литосферы Балтийского щита. Москва: НГК РАН. 1993. С. 76–78.
10. Вешев А. В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра, 1980. 391 с.
11. Ranalli G. Rheology of the crust and its role in tectonic reactivation. // Journal of Geodynamics. 2000. Vol. 30. P. 3–15.
12. Moisis K., Kaikkonen P. The present day rheology, stress field and deformation along the DSS profile FENNIA in the central Fennoscandian Shield. // Journal of Geodynamics. 2004. Vol. 38. Issue 2. P. 161–184.

13. Вагин С. А., Варданянц И. Л., Ковтун А. А и др. Магнитотеллурические зондирования в интервале периодов 10^{-3} – 10^{-4} с на Мурманском блоке Кольского полуострова и в центральной Карелии // Физика Земли. 1985. № 6. С. 48–56.
14. Велихов Е. П., Григорьев В. Ф., Жданов М. С. и др. Электромагнитное зондирование Кольского полуострова мощным крайне низкочастотным источником // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438. № 3. С. 390–395.
15. Жамалетдинов А. А., Токарев А. Д., Васильев и др. Частотное электромагнитное зондирование на Мурманском блоке. // В кн.: Проблемы комплексной интерпретации геолого-геофизических данных. АН СССР. 1991. Л. С. 94–97.

Сведения об авторах

Колобов Виталий Валентинович

ведущий научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», к.т.н.

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А

эл. почта: l_i@mail.ru

Баранник Максим Борисович

научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А

эл. почта: maxbar@ien.kolasc.net.ru

Ивонин Виктор Владимирович

научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А

эл. почта: ivonin@ien.kolasc.net.ru

Селиванов Василий Николаевич

заместитель директора Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», к.т.н.

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А

эл. почта: selivanov@ien.kolasc.net.ru

Жамалетдинов Абдулхай Азымович

главный научный сотрудник Санкт Петербургского филиала Учреждения Российской академии наук Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (СПбФ ИЗМИРАН), д.г.-м.н.

Россия, 191023, Санкт-Петербург, Мучной пер., 2, а/я 188.

эл. почта: abd.zham@mail.ru

Шевцов Александр Николаевич

старший научный сотрудник лаборатории геологии докембрия Геологического института — обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения

науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», к.ф.-м.н.
Россия, 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14
эл. почта: anshev2009-01@ Rambler.ru

Скороходов Алексей Андреевич

инженер-исследователь лаборатории геологии докембрия Геологического института — обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»
Россия, 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14
эл. почта: sammicne@yandex.ru

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.20-34
УДК 620.9 (470.21)

Н. М. Кузнецов, О. Е. Коновалова, В. В. Победоносцева

**УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ
В РЕГИОНАХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Аннотация

Статья представляет собой обзор составляющих и аспектов управления энергоэффективностью на примере регионов АЗРФ. Рассмотрены перспективы внедрения технологий SmartGrid, управления спросом на электроэнергию, использования возобновляемых источников энергии как открывающих новые возможности для повышения энергоэффективности в регионах Арктической зоны России.

Ключевые слова:

система управления энергоэффективностью, энергосбережение, государственная целевая программа, тариф, государственно-частное партнёрство, инвестор, мониторинг, энергоёмкость, стратегия, энергетическая декларация, ценозависимое снижение потребления электроэнергии.

N. M. Kuznetsov, O. E. Konovalova, V. V. Pobedonostseva

**MANAGEMENT OF ENERGY EFFICIENCY IN THE REGIONS OF THE ARCTIC
ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION**

Abstract

The article is a survey of the components and aspects of energy efficiency management on the example of the regions of the Arctic zone of Russian Federation. The prospects for introducing Smart Grid technologies, the demand response for electricity, and using renewable energy sources as opening up new opportunities for improving energy efficiency in the regions of the Arctic zone of Russia are considered.

Keywords:

energy efficiency management system, energy saving, state target program, tariff, public-private partnership, investor, monitoring, energy intensity, strategy, energy declaration, price-dependent reduction of electricity consumption.

Повышение эффективного использования энергетических ресурсов (энергоэффективности) определяется развитием экономики регионов [1], энергетической безопасностью, снижает экологическую нагрузку [2], способствует экономии энергии в многоквартирных домах [3]. Для повышения энергоэффективности необходимо развивать технологии, рыночные механизмы и государственные меры политики, которые могут влиять на производителей и потребителей энергии. Достижение успешных результатов мер политики по энергоэффективности возможно при наличии эффективной системы управления энергоэффективностью [4]. Управление энергоэффективностью — сочетание законодательной базы и механизмов финансирования, институциональной организации и механизмов координирования, которые направлены на поддержку реализации стратегий, политики и программ энергоэффективности (рис. 1).

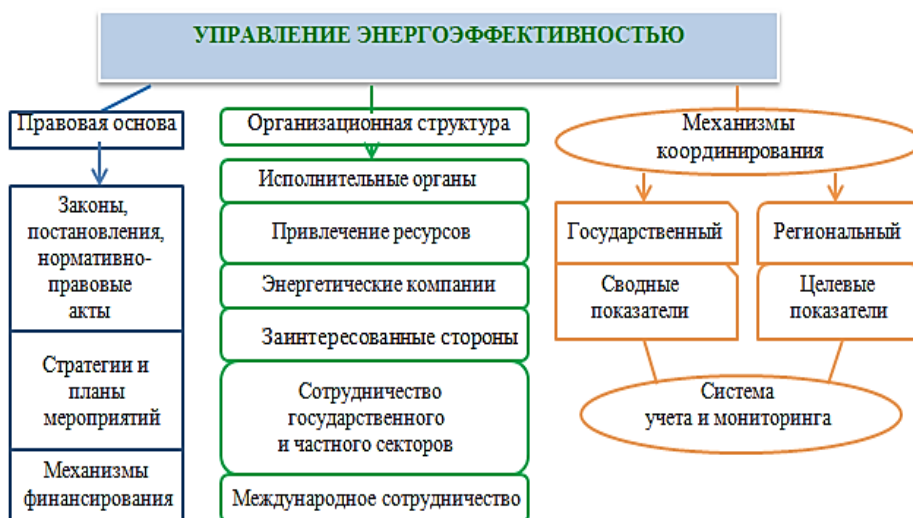


Рис. 1. Управление энергоэффективностью

Fig. 1. Energy efficiency management

Повышению энергоэффективности препятствуют барьеры рыночного, финансового, информационного и технического характера: невозможность оценить результаты внедрения энергосберегающих мероприятий, незаинтересованность инвесторов, отсутствие информации со стороны потребителей, тарифы на энергию не стимулируют инвесторов к энергосбережению, отсутствие наилучших доступных технологий и ключевых технологий энергоэффективности для региональных условий, недостаточная подготовка квалифицированных кадров в регионах. Для преодоления барьеров к энергоэффективности разрабатываются и реализуются целевые программы по энергосбережению (табл. 1).

Основной целью политики в области энергосбережения является создание рынка для оборудования и инфраструктуры, позволяющих внедрять энергоэффективность, а также развитие потенциала для предоставления товаров и услуг по внедрению энергоэффективности.

Система управления энергоэффективностью (СУЭ) ориентирована на обеспечение управления энергоресурсами предприятия с целью энергосбережения и повышения энергоэффективности и может использоваться для выполнения предприятием требований, установленных Федеральным законом «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» № 261-ФЗ и другими нормативно-правовыми актами в области энергосбережения и повышения энергоэффективности.

Таблица 1

Региональные планы мероприятий
по энергоэффективности Арктической Зоны Российской Федерации

Table 1

Regional measures plans for energy efficiency in the Arctic zone
of the Russian Federation

Регион АЗ РФ	Государственная программа	Период
Мурманская область	«Энергоэффективность и развитие энергетики»	2014–2020 гг.
Республика Карелия	«Энергосбережение, энергоэффективность и развитие энергетики Республики Карелия»	2015–2020 гг.
Архангельская область	«Развитие энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Архангельской области»	2014–2020 гг.
Ненецкий автономный округ	«Энергоэффективность и развитие энергетики в Ненецком автономном округе»	2014–2020 гг.
Ямало-Ненецкий автономный округ	«Энергоэффективность и развитие энергетики, обеспечение качественными жилищно-коммунальными услугами населения»	2014–2022 гг.
Красноярский край	«Энергоэффективность и развитие энергетики»	2018–2030 гг.
Республика Саха (Якутия)	«Энергоэффективная экономика»	2012–2020 гг.
Чукотский автономный округ	«Энергоэффективность и развитие энергетики Чукотского автономного округа»	2016–2020 гг.
Республика Коми	«Развитие строительства и жилищно-коммунального комплекса, энергосбережение и повышение энергоэффективности»	2014–2020 гг.

Отсутствие на предприятии системы управления энергоэффективностью может привести к увеличению расходов на энергопотребление, невозможности достижения установленных федеральным и региональным законодательством требований по энергосбережению, снижению результативности и энергоэффективности энергосберегающих мероприятий, снижению конкурентоспособности. Внутренняя нормативная документация предприятия должна регулировать производственную деятельность и устанавливать требования к энергоэффективности выпускаемой продукции. Элементами управляющей системы являются структура, документы и ресурсы, а процессами — планирование, организация работ и мониторинг. Объект воздействия этой системы – энергопотребление (следовательно – энергосбережение) предприятия. Результат работы системы — повышение энергоэффективности предприятия.

В первую очередь необходимо определить область действия СУЭ. Это может быть выполнение определенных работ, производственного цикла. При этом может сложиться ситуация, когда для достижения экономии энергоресурсов компания должна будет вложить немалые средства в техническое переоснащение. Чтобы не попасть в замкнутый круг ограниченного бюджета, компания должна определить приоритетные направления энергосбережения и повышения энергоэффективности. Энергетическая политика — это стратегические задачи организации в области энергосбережения и повышения энергоэффективности. Для выполнения этих задач необходимо составить реестр энергетических аспектов предприятия, влияющих на потребление энергоресурсов. Чтобы сформировать реестр энергетических аспектов, требуется анализ документации, фиксирующей результаты энергопотребления за определенный период, с отражением сбоев в энергопотреблении и указанием причин сбоев и принятых решений.

Для определения направлений энергосбережения необходимо проведение энергетического обследования предприятия [5] с оформлением документов, установленных федеральным и региональным законодательством.

Программа управления энергоэффективностью должна быть ориентирована на приоритетные направления энергосбережения и учитывать уровень автоматизации управленческих процессов. В программе формулируются цели, задачи, планы, мероприятия, детальное описание ответственности персонала, необходимые ресурсы, сроки. Кроме того, в программе необходимо учесть организационно-штатные изменения: возможно — создание подразделения с функциями СУЭ. Важная часть программы — процедуры контроля: виды, сроки, ответственность за контроль. Программа должна предусматривать элементы риск-менеджмента: определение способов профилактики сбойных ситуаций и формирование алгоритмов действий в сбойных ситуациях.

Законодательная база об энергоэффективности является важной частью организации управления энергоэффективностью и должна: формулировать цели и задачи политики по энергоэффективности; включать количественные цели и показатели с указанием сроков; обосновывать участие государства; определять ответственность за планирование и реализацию; включать компоненты контроля — мониторинг результатов и отчетность. Для реализации закона об энергоэффективности необходимо создание новых ведомств, технического потенциала, введение в действие нормативно-правовых актов, разработка стандартов, создание протоколов отчетности и механизмов стимулирования.

Наличие источника финансирования программ по энергоэффективности и реализации энергосберегающих мероприятий имеет определяющую роль. Нестабильное финансирование программ вызывает сомнение у организаторов проектов по энергоэффективности. Директивным органам при выборе механизма финансирования энергоэффективности следует учитывать следующие факторы: достаточность, стабильность, самостоятельность, источник финансирования, который не должен нарушать работу рынка или вытеснять другое финансирование. Самый распространенный механизм финансирования энергоэффективности — выделение средств из государственного бюджета. Специальные энергетические и экологические налоги на социальные цели являются эффективным источником финансирования энергоэффективности. Наличие портфеля из разных источников финансирования способствует общей надежности финансирования. Исполнительные органы должны координировать

анализ политики, управление проектом, маркетинг, оценку программы. Государственные органы управления стремятся найти наилучшее организационное решение для достижения результатов повышения энергоэффективности.

Сравнение ресурсов, выделяемых на энергоэффективность сделать сложно, так как требования к ресурсам зависят от реализуемой политики и организационной структуры энергоэффективности. Финансирование мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в регионах арктической зоны Российской Федерации за 2017 год [4] показано на рисунке 2.

Для сравнения экономической эффективности реализации энергосберегающих мероприятий необходимо разработать согласованную основу отчетности на уровне всех регионов.



Рис. 2. Расходы на энергоэффективность (млн руб.) в арктических регионах РФ, 0 — нет данных

Fig. 2. Energy efficiency costs (million rubles) in the Arctic regions of the Russian Federation, 0 — nodata

Поставщики энергии (энергетические компании) являются активными участниками реализации политики и программ энергоэффективности и потенциальным исполнительным органом в сфере энергоэффективности. У них появляются очевидные преимущества при условии создания правильной организационной основы и среды. У энергетических компаний также имеются недостатки, которые следует учесть при формировании политики энергоэффективности. Преимуществами являются: готовый доступ к капиталу; установившиеся отношения с потребителями, в том числе системы

расчетов и данных рынка; услуга и сеть предоставления услуг в своей юрисдикции; ответственность за прогноз и учет роста спроса на энергию в пиковое время. К недостаткам следует отнести: наложение коммерческих и социальных интересов; конкурентное отсутствие стимула, ведущее к затратам, повышению стоимости и сокращению продаж.

У энергетических компаний, как правило, есть коммерческая компетентность, которая делает их эффективными при реализации энергоэффективных мер. За осуществлением программ по энергоэффективности энергетических компаний регулирующие органы или правительство должны осуществлять контроль. Организация контроля программ по энергоэффективности, осуществляемых энергетическими компаниями, должна включать: оформленный план программы; прогнозируемое определение экономической привлекательности всех предлагаемых мер; механизм измерения результатов и подтверждения; регулярную отчетность, включая затраты, воздействие и экономичность; и возможность контролирующего органа и заинтересованных сторон давать замечания по планам и результатам программы и предлагать корректировки в план.

Привлечение заинтересованных сторон — важный компонент всей системы управления энергоэффективностью, который определяет успешное достижение результатов политики энергоэффективности.

Сотрудничество с частным сектором в разработке политики дает возможность государственной политике в полной мере воспользоваться преимуществами ресурсов и коммерческой энергии частного сектора; позволяет наряду с государственным финансированием привлекать частные инвестиции, а также частный сектор в исполнение программ; важно для стратегий преобразования рынка, так как возникновение спроса на более эффективную продукцию должно сопровождаться возникновением предложения со стороны производителей оборудования.

Одним из внебюджетных источников, привлекаемых для финансирования мероприятий по энергосбережению и повышению энергоэффективности, являются средства частных инвесторов, привлекаемые в рамках государственно-частного партнерства (ГЧП), в том числе на условиях оплаты из полученной экономии энергетических ресурсов в стоимостном выражении. При реализации проектов ГЧП используются разнообразные механизмы сотрудничества государственных структур и предприятий частного бизнеса. Они дифференцируются в зависимости от объема передаваемых частному партнеру правомочий собственности, инвестиционных обязательств сторон, принципов разделения рисков между партнерами, ответственности за проведение различных видов работ.

Наиболее распространены следующие механизмы партнерств:

- А. Модели BOT (build, operate, transfer), предполагающие закрепление объекта за инвестором на стадии эксплуатации на праве собственности.
- В. Модели BTO (build, transfer, operate), предполагающие передачу права собственности на объект государству и осуществление инвестором эксплуатации на ином правовом основании.
- С. Модели ROT (rehabilitate, operate, transfer), предполагающие осуществление инвестором реконструкции существующих объектов.
- Д. Модели, не предполагающие участия инвестора на этапе эксплуатации объекта:
- D1. D&B (designandbuild) — предполагает проектирование и строительство объекта инвестором.

D2. DBM (design, build, maintain) — предполагает проектирование, строительство и последующее обслуживание объекта инвестором.

D3. «turnkey contracts» — предполагает полностью строительство «под ключ».

E. Модели, направленные исключительно на эксплуатацию существующих объектов.

E1. O&M (operation and maintenance) — предполагает эксплуатацию и обслуживание объекта инвестором.

E2. S&M (service and management) — предполагает сервисное обслуживание и управление процессом эксплуатации на объекте.

Ключевыми принципами государственно-частного партнерства являются:

1. Официальные договоренности между государственными и частными участниками, которые фиксируются в нормативных правовых актах;

2. Органы государственного и муниципального управления выступают в проектах равноправным партнером для частного инвестора;

3. Проекты призваны реализовывать общественные интересы, которые формируются на основе общегосударственных целей;

4. Государство и частный инвестор совместно привлекают ресурсы, принимают решения в процессе финансирования и управления проектом.

Особое значение проекты государственно-частного партнерства имеют на уровне местного самоуправления. На долю городов и поселков (коммунальное хозяйство) приходится основная нагрузка по реализации множества проектов социального значения. Главная проблема, с которой сталкиваются коммунальные власти, состоит в недостатке финансовых ресурсов. Поэтому привлечение частного капитала к решению насущных социально-экономических задач на уровне местного самоуправления является важной задачей.

Международное сотрудничество и содействие важно как элемент общего управления энергоэффективностью. Международное содействие помогает развивать технические знания и опыт в регионах, системы управления и способствует привлечению заинтересованных сторон. Международное содействие развитию энергоэффективности может выполняться по следующим направлениям.

1. Подготовка проектов, финансируемых донорами, для получения устойчивых результатов.

2. Привлечение заинтересованных сторон для согласования важности политики энергоэффективности.

3. Создание устойчивых рынков для энергоэффективности.

В качестве интегральных показателей на уровне регионов используются: энергоёмкость ВРП; объём энергопотребления; объём энергосбережения, в т. ч. по видам топливно-энергетических ресурсов. Целевые показатели энергоэффективности по регионам Российской Федерации, территории которых входят в Арктическую зону, приведены в таблице 2.

Показатели энергоёмкости валового регионального продукта в 2017 г. [4] по регионам Арктической зоны Российской Федерации приведены на рисунке 3.

Для снижения указанного показателя в рамках стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года в сфере повышения энергоэффективности предусматривается оптимизация экономических механизмов северного завоза за счет использования возобновляемых и альтернативных источников энергии, реконструкции и модернизации выработавших ресурс энергетических установок, внедрения энергосберегающих материалов и технологий.

Цели программ энергоэффективности регионов

Таблица 2

Table 2

Objectives of regional energy efficiency programs

Регион	Сектор	Цель	Показатель	Период
Мурманская область	Вся экономика	Сокращение энергоёмкости	40 %	2007-2020 гг.
Республика Карелия	Вся экономика	Сокращение энергоёмкости	22,37 %	2015-2020 гг.
Архангельская область	Вся экономика (без учета Н.А.О)	Сокращение энергоёмкости	20,13 кг.у.т./тыс.руб.	2014-2020 гг.
Ненецкий автономный округ	Выработка ЭЭ на ДЭС	Снизить удельный расход топлива на выработку ЭЭ ДЭС	7 %	2014-2020 гг.
Ямало-Ненецкий автономный округ	Вся экономика	Сокращение энергоёмкости	10 кг.у.т./тыс.руб.	2014-2022 гг.
Красноярский край	Вся экономика	Сокращение энергоёмкости	13,88 кг.у.т./тыс.руб.	2018-2030 гг.
Республика Саха (Якутия)	Вся экономика	Сокращение энергоёмкости	40 %	2012-2020 гг.
Чукотский автономный округ	Вся экономика	Сокращение энергоёмкости	9,4 кг.у.т./тыс.руб.	2016-2020 гг.
Республика Коми	Вся экономика	Сокращение энергоёмкости	40 %	2007-2020 гг.

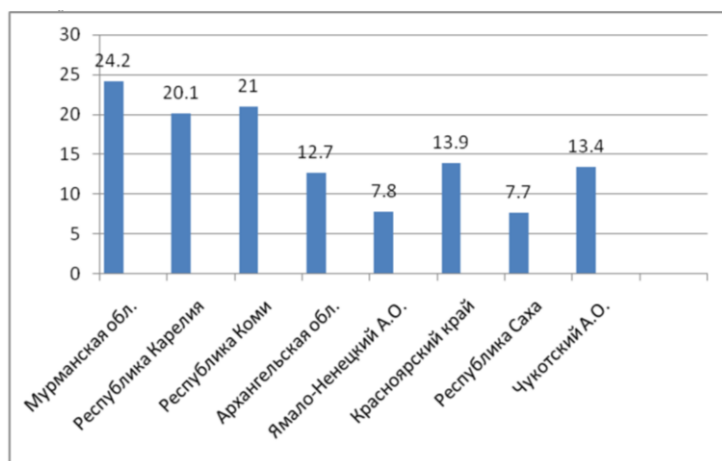


Рис. 3. Энергоёмкость ВРП по регионам Арктической зоны РФ, кг.у.т./тыс. руб.

Fig.3. Energy intensity of GRP in the regions of the Arctic zone of the Russian Federation, kg.w/ thousand rubles

В каждой отрасли для оценки уровня энергосбережения и энергоэффективности на основе конкретных индикаторов формируются целевые показатели. Так расчёт показателей энергоэффективности подпрограммы жилищно-коммунального хозяйства ведётся по следующим показателям: удельный расход воды населением, м³/чел.; удельный расход электрической энергии на общедомовые нужды в многоквартирных домах (МКД), кВт-ч/м²; удельный расход тепловой энергии в МКД, Гкал/ м²; оснащённость МКД общедомовыми приборами учета тепловой энергии, %; удельный расход тепловой энергии учреждений здравоохранения, Гкал/м²; удельный расход электрической энергии учреждений здравоохранения, кВт-ч/м²; удельный расход тепловой энергии учреждений образования, Гкал/м²; удельный расход электрической энергии учреждений образования, кВт-ч/м².

Мониторинг и анализ внедрения энергосберегающих мероприятий является важной частью управления энергоэффективностью. Мониторинг реализации государственной политики в области энергетической эффективности проводится по ключевым энергоэффективным технологиям [4]. Параметры, характеризующие ключевые результаты регионов Арктической зоны по реализации государственной политики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, приведены на рисунке 4.

В рамках мониторинга реализации механизмов поддержки государственной политики в первую очередь рассматривается важный элемент информационного обеспечения в бюджетном секторе — механизм энергетических деклараций. Внедрение механизма энергетических деклараций представляет регионам инструмент оценки состояния энергоэффективности зданий бюджетной сферы.

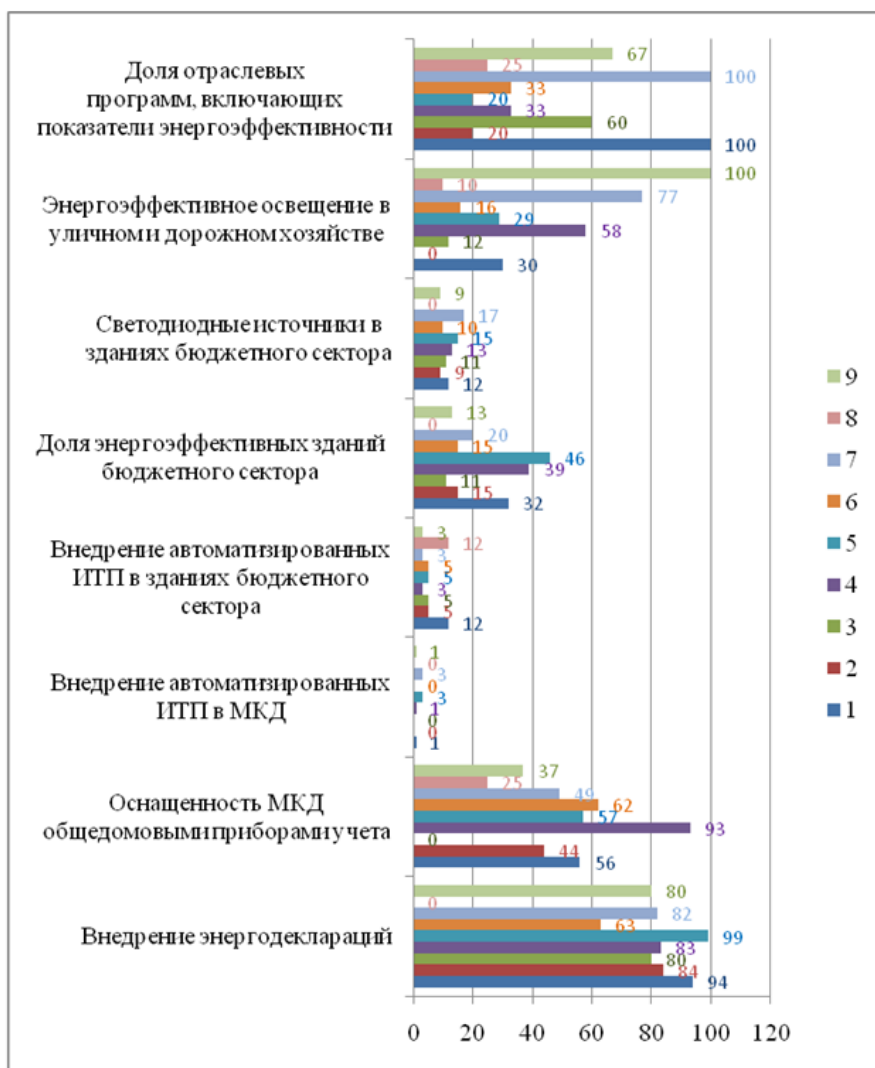
Важным элементом в разработке мониторинга и анализа является создание методик для оценки энергоэффективности. Индивидуальный тепловой пункт с автоматическим погодным регулированием является одной из ключевых технологий [6], позволяющих достигнуть экономии топливно-энергетических ресурсов в многоквартирных домах и зданиях бюджетного сектора.

Выполненный расчёт экономической эффективности при внедрении индивидуального теплового пункта ($K = 1,5$ млн руб., $T = 10$ лет, $D, 620$ тыс. руб/год) позволяет определить срок окупаемости проекта.

По приведенной методике можно рассчитать экономическую эффективность внедряемых наилучших доступных технологий, выполняемых по муниципальным программам энергосбережения.

Энергоснабжение изолированных территорий в России характеризуется недостаточно высоким уровнем надежности и значительными субсидиями из бюджета (до 60–65 млрд руб. в год) на компенсацию выпадающих доходов организаций. Меры поддержки территорий носят региональный характер, не являются системными. В развитых странах проблемы энергоснабжения изолированных территорий сходны с российскими, но характеризуются системным подходом к решению. За рубежом основным направлением государственной политики в этой сфере является активное стимулирование использования ВИЭ за счет их поддержки и снижения субсидирования цен на традиционные энергоресурсы. Проблемы изолированных территорий в России решаются на региональном уровне, исключением является поддержка населения за счет установления льготных тарифов. Экономически обоснованный тариф на

электроэнергию, вырабатываемую на дизельных электростанциях в населенных пунктах Чаванга, Чапома, Тетрино и Пялица Терского района Мурманской области в 2017 г., составил 20,53 руб/ кВт-ч, а действующий для потребителей — 7,95 руб/кВт-ч. [7]. Кроме установления льготных тарифов в регионах проводится модернизация систем энергоснабжения потребителей с использованием возобновляемых источников энергии [8, 9, 10].



1. Мурманская область, 2. Республика Карелия, 3. Архангельская область,
4. Ненецкий автономный округ, 5. Ямало-Ненецкий автономный округ,
6. Красноярский край, 7. Республика Саха (Якутия),
8. Чукотский автономный округ, 9. Республика Коми

Рис. 4. Реализация государственной политики энергетической эффективности, %

Fig. 4. Implementation of the state policy of energy efficiency, %

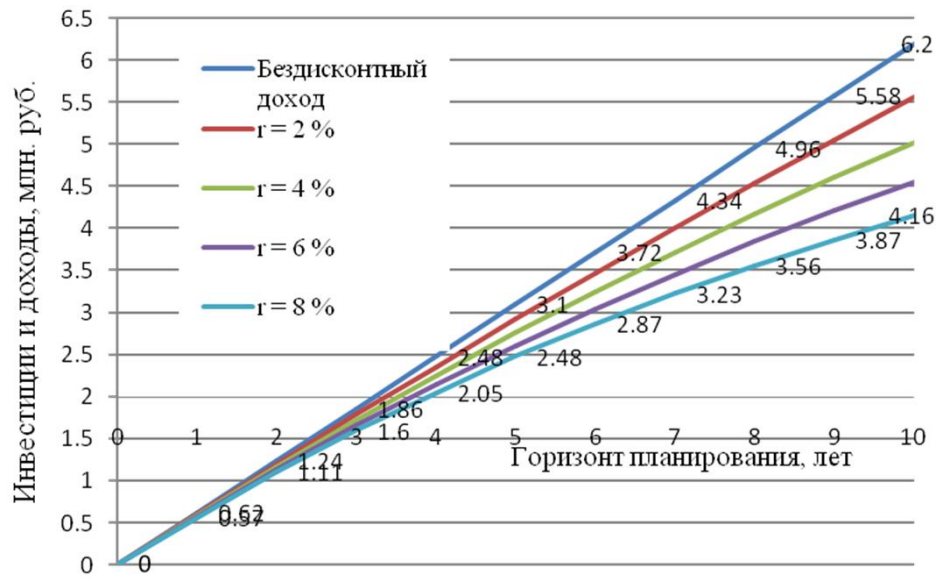


Рис. 5. Диаграмма стоимости инвестирования проекта

Fig. 5. Project investment cost chart

Мурманская область имеет значительный потенциал возобновляемых источников энергии, но в настоящее время установленная мощность их составляет менее 0,1 % [10] мощности всех электростанций (рис. 6).

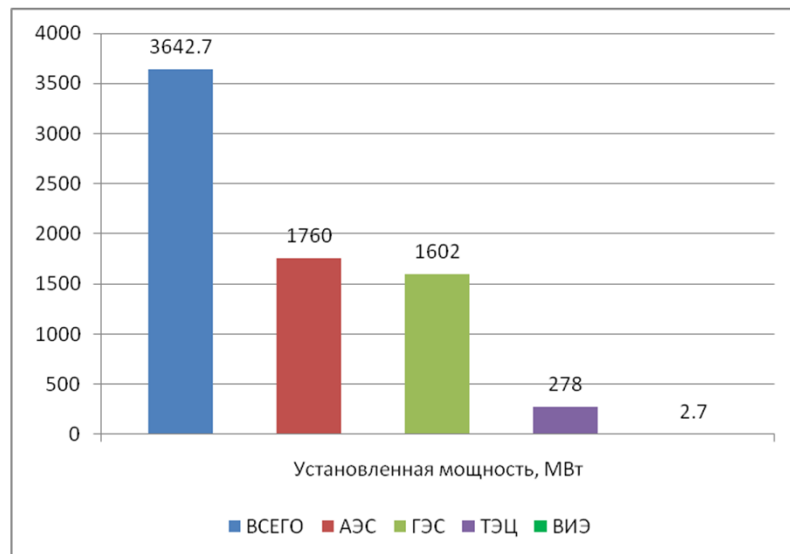


Рис. 6. Установленная мощность электростанций по типам энергоносителей

Fig. 6. Installed capacity of power plants by type of energysources

Основные направления развития ВИЭ в регионе: энергообеспечение удаленных территорий [11], строительство промышленных ветропарков, строительство котельных на местных видах топлива. Развитие технологий на базе возобновляемых источников позволит улучшить качество жизни людей и экологическую обстановку в регионе. Характерными чертами управления энергоэффективностью в Мурманской области после 2025 г. станут развитие интеллектуальных энергетических сетей, опирающихся на мощную сеть разноплановых распределенных источников энергии; разработка мероприятий по повышению качества услуг ЖКХ через введение комплексной системы стандартов в области ресурсосбережения и энергоэффективности.

Уровень развития энергетики отражает уровень развития производительных сил, научно-технического прогресса и жизни населения. Научно-техническая и инновационная политика в энергетическом секторе должна основываться на современных достижениях фундаментальной и прикладной науки, обеспечивая создание и внедрение новых высокоэффективных технологий. Снижение энергоемкости продукции и, соответственно, повышение уровня энергоэффективности предприятия — техническая проблема, требующая технологических и организационных решений. Основная идея решения управленческой проблемы заключается в последовательном применении системного подхода к управлению энергоэффективностью (энергетический менеджмент). Система энергоменеджмента — это комплекс взаимосвязанных и взаимодействующих элементов предприятия, направленный на формирование энергетической политики предприятия, постановку целей, разработку мероприятий по достижению этих целей, анализ существующих показателей как основы составления новых энергетических бюджетов. Учитывая важность данных вопросов управления энергетическими ресурсами и энергоэффективностью, система энергоменеджмента должна быть обеспечена соответствующим нормативным инструментарием. Ведущую роль в решении указанной проблемы играет внедрение и использование международных стандартов. Современные международные стандарты — охватывают различные области деятельности: управление качеством (ISO 9001:2008), энергетику и энергоэффективность (BS EN 16001:2009/ISO 50001), экологию (ISO 14001) и другие. ISO 50001 создает основу для промышленных предприятий, коммерческих объектов и организаций при внедрении СУЭ.

Повышение требований к экологии, состоянию технологического оборудования, надежности систем электроснабжения и взаимодействие с иностранными энергетическими компаниями предопределили модернизацию российской электроэнергетики на базе инновационной платформы SmartGrid. В настоящее время в России начинается разработка концепции по созданию интеллектуальной энергетической системы. Особое внимание в этой концепции уделяется вопросам развития и размещения генерирующих источников — атомных и гидроэлектростанций, ТЭЦ и возобновляемых источников электроэнергии [12]. Учитываются необходимость рационального использования природных ресурсов, требования потребителей с неравномерным графиком нагрузки, задачи энергоснабжения крупных мегаполисов и децентрализованной нагрузки. В свою очередь это определяет новые требования к структуре топливно-энергетического баланса, схеме управления в электроэнергетике, оптимизации межсистемных потоков, что приводит к необходимости развивать

активно-адаптивную сеть (магистральные и распределительные линии электропередачи и автоматизированные системы контроля и управления) в рамках Единой национальной электрической сети (ЕНЭС) России и межрегиональных электрических связей.

Перевод российской ЕНЭС в формат активно-адаптивной позволит: повысить системную надежность электросетевого комплекса; получить технико-экономический эффект от расположения объектов ЕНЭС в различных часовых поясах; снизить потери и расход энергоресурсов; своевременно подключать или отключать дополнительные источники энергии, в том числе возобновляемые; уменьшить капиталовложения, связанные со строительством и эксплуатацией энергообъектов; гибко регулировать перетоки мощности, обусловленные изменением генерации и потребления; объединить на технологическом уровне генерирующие мощности, распределительные сети и энергопринимающие устройства, принадлежащие разным собственникам. Успешное внедрение «умных сетей» возможно при значительных инвестициях в развитие инфраструктуры и разработку программного обеспечения компонентов оборудования с развитой логикой, неразрывно связано с конкретными техническими мероприятиями по повышению энергетической эффективности оборудования и сетей.

Мурманская область полностью входит в Арктическую зону РФ и относится к числу наиболее энерговооружённых и энергоизбыточных территорий России. Производимая электроэнергия в полном объеме обеспечивает спрос внутри области, более четверти выработанной электроэнергии поступает в объединенную энергосистему России, а также на экспорт в Финляндию и Норвегию. Основу экономики Мурманской области составляют предприятия горно-металлургического комплекса - крупнейшие потребители электроэнергии в регионе: Кольская горно-металлургическая компания (ГМК), ОАО «Апатит», Кандалакшский алюминиевый завод (КАЗ), Оленегорский и Ковдорский горно-обогащительные комбинаты (ГОК) [13]. Их доля в общем объеме электроэнергии, передаваемой по сетям АО «Колэнерго», составляет более 70 %. Поэтому в области создается Кольский химико-технологический (горно-химический, горно-металлургический) кластер. Имеются предпосылки для формирования транспортно-логистического, нефтегазового, рыбопромышленного, туристического кластеров. В области формируется высокотехнологичный кластер по строительству объектов добычи и переработки углеводородов Арктики.

Снижение потребления электроэнергии в рамках ценозависимого снижения потребления (ЦЗСП) может осуществляться за счет использования, например, локальных источников энергоснабжения потребителя. Локальная генерация обеспечивается возобновляемыми и альтернативными источниками энергии и малыми электростанциями [13], дополняя сеть собственной инфраструктурой трансмиссии и распределения. Поэтому участие в ЦЗСП может рассматриваться как фактор стимулирования использования ВИЭ в регионе.

При достижении достаточно высокого уровня тарифов крупным предприятиям было бы выгоднее создавать и содержать свои собственные энергетические мощности, чем покупать электроэнергию на рынке, однако это может остановить их развитие вследствие отвлечения инвестиций от модернизации производства. Объединение же предприятий в кластеры обеспечит более значительные потоки инвестиций через них (эффект масштаба)

и позволит при необходимости создавать в рамках кластера локальные источники энергоснабжения предприятий, с помощью которых будет осуществимо участие в ЦЗСП. Организационно-экономические методы управления инвестициями [14] в энергетическом комплексе регионов должны быть ориентированы на реализацию общенациональной задачи — повышение энергоэффективности валового внутреннего продукта.

Выводы

В рамках стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности предусматривается:

- оптимизация экономических механизмов "северного завоза" за счет использования возобновляемых и альтернативных, в том числе местных источников энергии, реконструкции и модернизации, выработавших ресурс энергетических установок;
- обеспечение энергонезависимости удаленных малых населенных пунктов, разработка и реализация проектов в области энергосбережения и энергоэффективности;
- обновление и модернизация жилищно-коммунального хозяйства на основе современных энергосберегающих технологий.

Литература

1. Победоносцева В. В. Перспективы повышения энергетической эффективности экономики Мурманской области / В. В. Победоносцева // Интеграция науки и производства. 2010. № 5. С. 54–55.
2. Кузнецов, Н. М. Экологические аспекты в энергетике Мурманской области / Н. М. Кузнецов, О. Е. Коновалова // В сборнике: Научные и методические основы управления развитием энергетики Баренцрегиона. Апатиты, 1997. С. 84–99.
3. Коновалова О. Е. Опыт реализации энергосберегающих мероприятий в многоквартирном жилом доме г. Апатиты / О. Е. Коновалова // Труды Кольского научного центра РАН. 2011. № 2 (5). С. 214–220.
4. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации в 2017 году // Минэкономразвития России. 2018. 263 с.
5. Kuznetsov N. M. Energy saving and energy audit / N.M.Kuznetsov // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2013. № 2. С. 41.
6. Кузнецов Н. М. Эффективность внедрения наилучших доступных энергосберегающих технологий в Мурманской области / Н. М. Кузнецов, В. В. Победоносцева // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 143-148.
7. Башмаков И. А. Анализ финансовой нагрузки на регионы с дорогостоящим децентрализованным энергоснабжением / И. А. Башмаков, М. Г. Дзедзичек // Электронный журнал «ЭНЕРГОСОВЕТ». 2017. № 47. С. 7–16.
8. Кузнецов Н. М. Древесные отходы – дополнительный источник энергии на северо-западе России / Н. М. Кузнецов // Горный журнал. 2004. № 5. С. 119–120.
9. Fedorov O. V. Alternativeenergysourcesforremotecustomers / O. V. Fedorov, M. M. Kuznetsov // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2015. № 6 (123). P. 141144.

10. Коновалова О. Е. Возобновляемые источники энергии в Мурманской области / О. Е. Коновалова, Н. М. Кузнецов // Промышленная энергетика. 2018. № 9. С. 51–56.
11. Минин, В. А. Перспективы использования микроГЭС в удаленных районах Севера / В. А. Минин, О. Е. Коновалова, Е. А. Иванова // Вестник Кольского научного центра – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2013. № 3(14). С. 64–75.
12. Коновалова О. Е. Реконструкция энергосистемы Кольского полуострова, как базис интеллектуальной энергосистемы (SMARTGRID) / О. Е. Коновалова // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 366–369.
13. Разработка научных основ эффективного развития энергосбережения, энергоэффективности и использования возобновляемых источников энергии в районах Севера: отчет о НИР № 0226-2014-0001 / ФАНО; ЦФТПЭС КНЦ РАН; рук Минин В. А.; отв. исп. Кузнецов Н. М.; исполн.: Баранник Б. Г. [и др.]. Апатиты, 2016. 234 с. № ГР 01201454701. Инв. № АААА-Б17-217020640098-5.
14. Победоносцева В. В. Экономическая политика и организационно-экономические вопросы управления инвестициями в энергетическом комплексе / В. В. Победоносцева, Г. М. Победоносцева // Социум и власть. 2012. № 4(36). С. 94–97.

Сведения об авторах

Кузнецов Николай Матвеевич

Ведущий научный сотрудник лаборатории энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», к.т.н. Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, Академгородок, д. 21А
Эл.почта: kuzn55@mail.ru

Победоносцева Вероника Валерьевна

старший научный сотрудник лаборатории энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», к.э.н. Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21-А
Эл.почта: pobedonosceva@ien.kolasc.net.ru

Коновалова Ольга Евгеньевна

младший научный сотрудник лаборатории энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21-А
Эл.почта: konovalova@ien.kolasc.net.ru

Г. П. Фастий, А. В. Бурцев, В. В. Ярошевич

ЗАДАЧА ВЫПОЛНЕНИЯ МОЛНИЕЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

Аннотация

В статье проведено исследование молниезащиты подстанций, расположенных на Кольском полуострове, который является районом с низкой проводимостью грунта. Приведены результаты расчётов для вариантов защиты оборудования подстанций с помощью вентильных разрядников и нелинейных ограничителей перенапряжений от грозовых волн, набегающих по воздушным линиям электропередачи.

Ключевые слова:

подстанция, молниезащита, заземление опор, электропроводность грунта, вентильный разрядник, нелинейный ограничитель перенапряжений.

G. P. Fastiy, A. V. Burtsev, V. V. Yaroshevich

THE PROBLEM OF IMPLEMENTATION OF LIGHTNING PROTECTION IN THE KOLA PENINSULA

Abstract

The article conducted a study of lightning protection of substations located on the Kola Peninsula, which is an area with low soil conductivity. The results of calculations are given for options for protecting substation equipment using valve-type arresters and non-linear surge suppressors against thunderstorm wave's incident on overhead power lines.

Keywords:

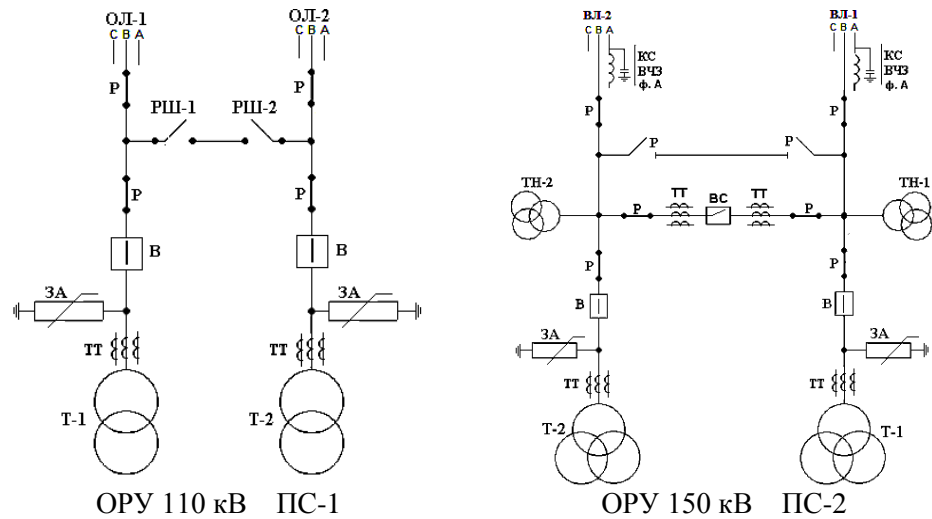
substation, lightning protection, grounding of supports, electrical conductivity of soil, valve-type arrester, non-linear surge suppressor

До настоящего времени проблема молниезащиты оборудования распределительных устройств (РУ) с подключенными воздушными линиями (ВЛ) электропередачи остается актуальной, так как имеются не разрешенные противоречия предписаний нормативных документов и условий реализации требований, в частности для молниезащитных заземлений элементов сети. Это фактически исключает возможность применения не типовых решений.

Возможные проблемы и поиск нетиповых решений рассмотрены на примерах подстанций расположенных на Кольском полуострове. Спецификой района являются:

- низкая электропроводность грунта ($\rho_{ГР}$ достигает 5000 Ом·м и выше), при которой затрудняется или исключается возможность реализации требуемых ПУЭ молниезащитных заземлений подстанций и опор ВЛ [1];
- уменьшение интенсивности грозовой деятельности по ПУЭ до 20 грозовых часов в год и ниже [2];
- по ПУЭ допускается сооружение и эксплуатация ВЛ или их участков без молниезащитных тросов [2].

Схемы подстанций 110 кВ, 150 кВ и 330 кВ представлены на рис. 1 и 2.



Р, РШ — разъединитель, В, ВС — выключатель, ТТ — трансформатор тока, КС — конденсатор связи, ВЧЗ — высокочастотный заградитель, ТН — трансформатор напряжения, ЗА — защитный аппарат, Т — силовой трансформатор

Рис. 1 Принципиальные схемы ОРУ 110 кВ и 150 кВ подстанций

Fig. 1. Circuit diagrams of 110 kV and 150 kV outdoor switchgear substations

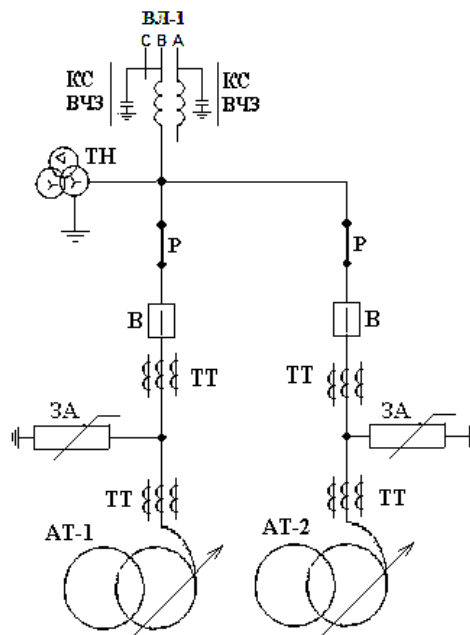


Рис. 2. Принципиальная схема ОРУ 330 кВ подстанции ПС-3

Fig. 2. Schematic diagram of the substation PS-3 330 kV outdoor switchgear

Подстанция 110 кВ (ПС-1) — тупиковая, два блока линия-трансформатор с выключателями, работающих в раздельном режиме без автоматической переключки. То есть в нормальном режиме каждый блок включает одну ВЛ, один трансформатор и один защитный автомат.

Подстанция 150 кВ (ПС-2) — проходная включает также два блока линия-трансформатор с автоматической переключкой на стороне линий. Основной режим работы подстанции — транзит энергии по ВЛ и электроснабжение подключенных потребителей.

Подстанция 330 кВ (ПС-3) — тупиковая, одна линия, два автотрансформатора (АТ) с выключателями и двумя защитными аппаратами. Характерной особенностью рассматриваемых подстанций является малое число подключенных ВЛ, относительно компактное исполнение ОРУ, минимальное число защитных аппаратов и не большие защитные расстояния от защитных аппаратов до защищаемого оборудования.

Исследования молниезащиты подстанций выполнено в части защиты от грозовых волн, набегающих по ВЛ. Моделирование выполнено с использованием языка программы АТР-ЕМТР в среде разработки АТРDraw в трехфазной постановке [3], перекрытия изоляции ВЛ моделировались на ближайших к точке удара молнии опорах (с обеих сторон). Учтено влияние электропроводности грунта, а также сопротивлений заземления опор в месте перекрытия изоляции ВЛ и на всех опорах соединенных молниезащитным тросом. Таким образом, учтено влияние потерь энергии грозовых волн, обусловленных емкостной связью проводов с тросом и стеканием наведенных напряжений через заземления троса на опорах.

В районах с низкой электропроводностью грунта на условия формирования грозовых перенапряжений существенное влияние оказывают импульсное сопротивление заземления опор ВЛ и активные потери энергии волны при ее распространении по ВЛ. Поэтому для разделения грозовых перенапряжений, на условия формирования которых влияет сопротивление заземления опор, а также для сопоставимости показателей введено понятие опасности ударов молнии с разделением их по признаку образования грозовой волны на проводе ВЛ [4]:

- для прямых ударов или прорывов молнии на провод ВЛ,
- для ударов молнии в заземленные опоры или трос с последующим обратным перекрытием изоляции ВЛ на провод.

В последнем случае опасность удара молнии включает как образование обратного перекрытия изоляции и волны на проводе ВЛ, так и формирование параметров волн опасных для изоляции оборудования подстанций. Таким образом, оба этих события зависят от параметров тока молнии, следовательно, опасность ударов молнии в заземленные конструкции ВЛ с последующими обратными перекрытиями для конкретной точки ВЛ (S_{OBR}) определяется интегрированием по кривой опасных токов молнии (вызывающих опасные перенапряжения на изоляции оборудования) [4, 5]

$$S_{OBR} = P_{OBR}(I_M > I_{KP}, I'_M > I'_{KP})$$

где $P_{OBR}(I_M > I_{KP}, I'_M > I'_{KP})$ — вероятность удара молнии с опасными параметрами тока в расчетном варианте удара молнии в опору или трос с последующим обратным перекрытием.

Для случаев прорыва молнии через тросовую защиту на провод ВЛ опасность этих ударов для оборудования подстанции определяется из выражения

$$S_{\text{ПР}} = P_{\text{ПРОР}} \cdot P_{\text{ПР}}(I_{\text{М}} > I_{\text{КР}}, I'_{\text{М}} > I'_{\text{КР}})$$

где $P_{\text{ПРОР}}$ — вероятность прорыва молнии на провод через тросовую защиту; $P_{\text{ПР}}(I_{\text{М}} > I_{\text{КР}}, I'_{\text{М}} > I'_{\text{КР}})$ — вероятность удара молнии с опасными параметрами тока в расчетном варианте удара молнии в провод.

Расчетная интенсивность грозовой деятельности принята 20 грозовых часов в году, что характерно для ряда рассматриваемых регионов, например, для Кольского полуострова. В расчетах варьировались импульсные сопротивления заземления опор, величины которых как удовлетворяют (15 и 30 Ом), так и не соответствуют (50 и 100 Ом) требованиям ПУЭ [2] для районов с низкой проводимостью грунта.

Расчеты выполнялись для вариантов защиты оборудования подстанций с помощью вентильных разрядников (РВ) и нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН). Сопоставление результатов расчетов для ПС-1 110 кВ приведены на рис.3, где рассмотрено влияние сопротивлений заземления опор $R_{\text{З}}$, типа защитных аппаратов на подстанции. На рис.3а и 3б даны зависимости опасности ударов молнии с прорывами на провода, а на рис. 3в и 3г — зависимости для ударов молнии в опоры и трос.

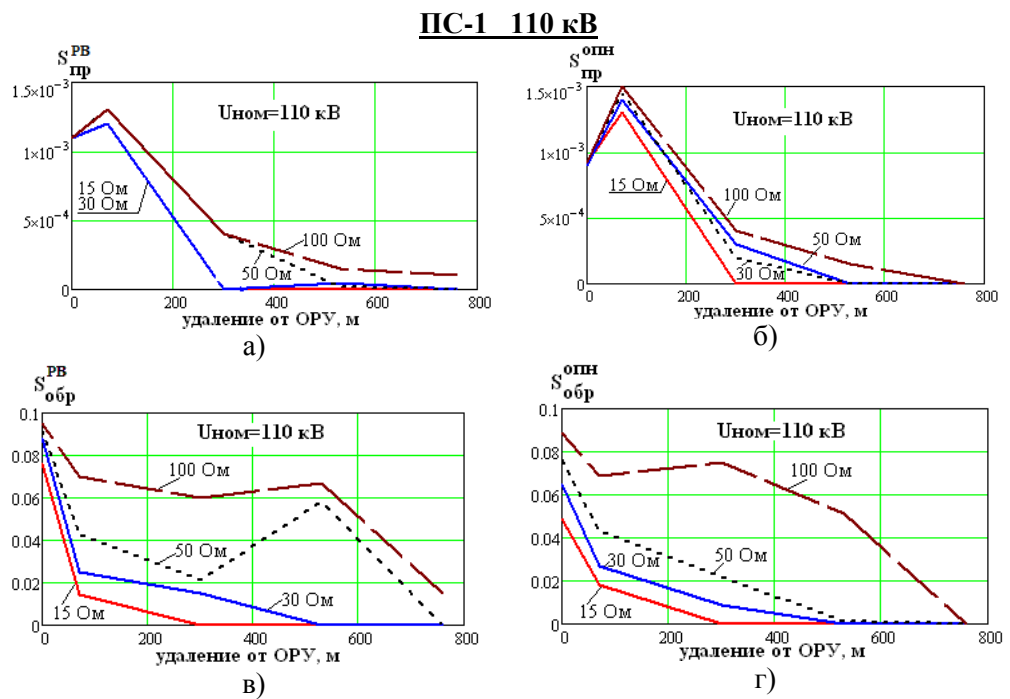


Рис. 3. Зависимости опасности ударов молнии с прорывами на провода (а, б) и в опоры и трос (в, г) ВЛ от удаления точки удара молнии от ОРУ для разных значений сопротивлений заземления опор на подходе и вариантов защиты с помощью РВ (а, в) или ОПН (б, г)

Fig. 3. The dependence of the hazard of lightning strike to phase wire (а, б) and to support and ground wire (в, г) on the removal of the lightning impact point from open switchgear for different values of grounding resistance of supports on the approach (а, б, в, г) and protection options (valve-type arresters or non-linear surge suppressors)

Как видно, опасность таких ударов молнии с прорывами на провода (рис. 3а и б) несопоставимо мала в сравнении с опасностью ударов молнии в опоры и трос с последующим обратным перекрытием изоляции ВЛ на провод (рис. 3в и г). Это подтверждает высокую эффективность защиты проводов тросами.

При наличии молниезащитного троса основную опасность для оборудования представляют удары молнии в опоры и трос, как видно опасность обратных перекрытий существенно зависит от сопротивления заземления опор. Из рис. 3а и 3б видно, что опасность ударов молнии с прорывами на провод в ряде случаев слабо зависит от величины сопротивления заземления опор, которое влияет на остающееся напряжение на проводе после среза волны в результате перекрытия изоляции ВЛ.

Для ударов молнии в заземленные элементы подходов ВЛ к ПС-1 110 кВ можно отметить следующее:

- при сопротивлениях заземления опор не более 30 Ом опасная зона уменьшается до 0,5 км (30 Ом) или 0,3 км (при $R_{ЗИ}$ опор = 15 Ом) как для защиты с помощью вентильного разрядника типа РВС-110, так и для защиты с ОПН;
- при увеличении сопротивления заземления опор до 50 Ом длина опасной зоны увеличивается почти до 0,8 км (защита с РВС-110); в этом случае проявляется эффективность применения ОПН-110 вместо РВС-110 (рис. 3г);
- дальнейшее увеличение сопротивления $R_{ЗИ}$ снижает эффективность защиты также с ОПН, однако длина опасной зоны для ударов с обратными перекрытиями практически остается около 0,8 км;

Кроме того, можно отметить увеличение опасности ударов молнии в третью опору при $R_{ЗИ} = 30$ Ом и более.

Учитывая небольшое влияние опасности ударов молнии с прорывами на рис. 4 приведены аналогичные результаты обработки расчетов для подстанций ПС-2 150 кВ и ПС-3 330 кВ, в которых приведены только опасности ударов молнии в опоры и трос ВЛ с последующими обратными перекрытиями изоляции ВЛ.

Из данных, приведенных на рис. 4а и 4б для ударов молнии в заземленные элементы подходов ВЛ к ПС-2 150 кВ можно отметить практически те же особенности, что и для ПС-1 110 кВ, но при некотором изменении расстояния до точки удара молнии:

- минимальная длина опасной зоны обеспечивается при $R_{ЗИ}$ опор не более 15 Ом и составляет 0,3 км при защите с ОПН или почти 0,6 км при использовании защиты с РВС;
- при $R_{ЗИ}$ опор равном 30 Ом длина опасной зоны при защите с РВ увеличивается до 0,8 км, а при использовании ОПН менее 0,6 км;
- увеличение $R_{ЗИ}$ опор до 50 Ом при использовании на ПС-2 ОПН 150 приводит к снижению эффективности защиты только за счет влияния заземления первой опоры; длина опасной зоны для этих ударов молнии не меняется и равна 0,6 км; в схеме с РВ на ПС-2 при $R_{ЗИ} = 50$ Ом длина опасной зоны также остается равной 0,8 км, как при $R_{ЗИ} = 30$ Ом;
- увеличение $R_{ЗИ}$ опор до 100 Ом увеличивает длину опасной зоны практически до 1 км.

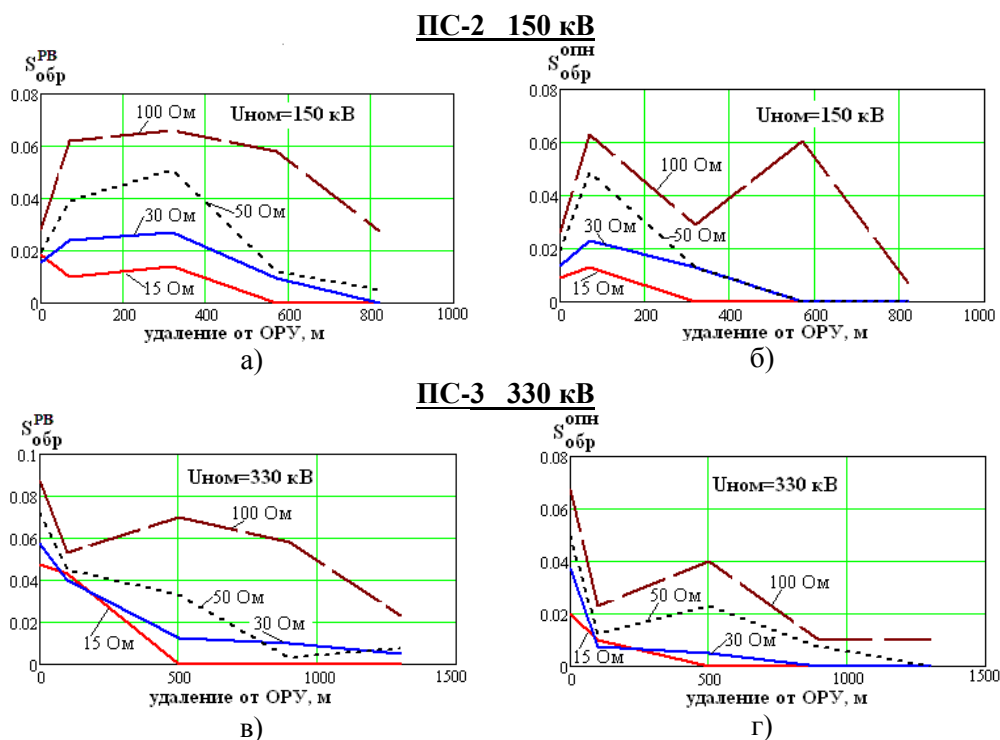


Рис. 4. Зависимости опасности ударов молнии в опоры и трос ВЛ от удаления точки удара молнии от ОРУ для разных значений сопротивлений заземления опор на подходе и вариантов защиты с помощью РВ (а, в) или ОПН (б, г)

Fig. 4. The dependence of the hazard of lightning strike to support and ground wirw on the removal of the lightning impact point from open switchgear for different values of grounding resistance of supports on the approach and protection options valve-type arresters (а, б) or non-linear surge suppressors (в, г).

Для ударов молнии в заземленные элементы подходов ВЛ к ПС-3 330 кВ (рис. 4в и 4г) можно отметить следующее:

- эффективность применения ОПН вместо вентильных разрядников; при этом особое внимание надо уделять заземлению 2-й опоры ВЛ;
- длина опасной зоны для ударов молнии в опоры и трос не превышает 1,5 км; при использовании ОПН 330 требования к 3-й и 4-й опорам могут быть значительно упрощены (50 или 100 Ом).

По результатам обобщения исследований рассчитаны показатели надежности защиты трансформаторов ПС-1, ПС-2 и ПС-3 в зависимости от величины сопротивления заземления опор на подходах, которые приведены на рис. 5.

Из приведенных зависимостей видно, что даже при выполнении требований к удалению защитных аппаратов от защищаемого оборудования показатели надежности молниезащиты могут не соответствовать требованиям вследствие увеличения опасности ударов молнии с обратными перекрытиями изоляции ВЛ при низкой электропроводности грунта. Так для рассмотренной

подстанции ПС-1 110 кВ сопротивление заземления опор должно быть менее 30 Ом в вариантах защиты с РВС-110 и ОПН. Следовательно, необходимы не типовые решения.

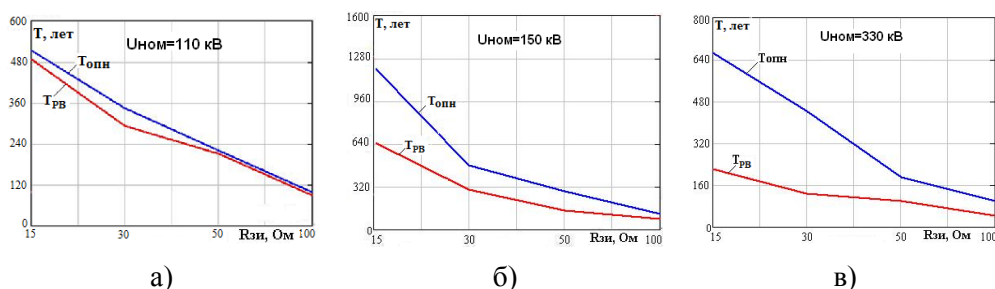


Рис. 5. Зависимость числа лет без грозových повреждений трансформатора от импульсного сопротивления заземления опор $R_{зи}$

Fig. 5. The dependence of the year's number without transformer damage on the impulse resistance of the supports grounding.

Для рассмотренной подстанции ПС-2 150 кВ использование ОПН позволяет несколько снизить требования к заземлениям опор на подходах — при типовом решении не более 35 Ом. При этом следует учитывать снижение надежности молниезащиты в ремонтном режиме при выводе из работы одного из трансформаторов с комплектом ОПН.

Для тупиковой ПС-3 330 кВ также в ремонтном режиме с одним РВ не обеспечивается необходимая надежность молниезащиты даже при $R_{зи} = 15$ Ом и при 20 грозových часов в году. Применение ОПН дает необходимый эффект лишь при $R_{зи}$ немногим более 15 Ом.

Выводы

1. В районах с низкой электропроводностью грунта при невозможности (или нецелесообразности) выполнения заземлений опор с сопротивлением не более 30 Ом рекомендуемые ПУЭ системы молниезащиты не обеспечивают требуемой надежности. При этом увеличение длины подходов, защищенных тросом, не влияет на повышение эффективности молниезащиты подстанций.

2. Имеется возможность варьирования исполнения заземлений опор на подходах со снижением требований к удаленным опорам.

3. Имеется возможность сокращения длины опасной зоны для ударов молнии в опоры и трос, что позволяет ограничить число опор, для которых необходимо выполнять жесткие требования.

4. Учет характеристик реализованных заземлений опор и конструктивных особенностей ОРУ позволяет скорректировать требования для конкретной подстанции.

5. Целесообразно нормативными документами предусмотреть возможность варьирования исполнения молниезащитных мероприятий с учетом региональных особенностей для реализации эффективной молниезащиты и снижения затрат.

Литература

1. М. В. Костенко, Ю. М. Невретдинов, Ф. Х. Халилов Молниезащита электрических сетей в районах с высоким удельным сопротивлением грунта. Л.: Наука, 1984. 112 с.
2. Правила устройства электроустановок. СПб.: Издательство ДЕАН, 2003. 928 с.
3. Селиванов В. Н. Использование программы расчёта электромагнитных переходных процессов АТР-ЕМТР в учебном процессе // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 1. С. 107–112
4. Невретдинов Ю. М., Власко Д. И. Исследование защиты подстанции 150 кВ от грозовых волн с учетом реальных заземлителей опор ЛЭП на подходах // «Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика», вып. 2, 2011 (4). С. 79–88.
5. Невретдинов Ю. М., Фастий Г. П. Атмосферное электричество и молниезащита в электроэнергетике. Учебное пособие по курсу «Атмосферное электричество и молниезащита» / Ю. М. Невретдинов, Г. П. Фастий. Мурманск: изд. МГТУ, 2015. 188 с.

Сведения об авторах:

Фастий Галина Прохоровна,

научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А,
эл. почта: fastiy@ien.kolasc.net.ru

Бурцев Антон Владимирович,

младший научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»,

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: a.burtsev@tehnord.ru

Ярошевич Вера Васильевна,

научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А,
эл. почта: yaroshevich_vera@mail.ru

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.43-48
УДК 621.315.1+004.04

А. В. Бурцев, Г. П. Фастий, В. В. Ярошевич

ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ BIGDATA В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Аннотация

В статье приведена информационная модель воздушной линии для применения в разработке концепции системы обработки больших объемов данных. Подробно рассмотрен каждый блок модели, показаны перспективы ее применения.

Ключевые слова:

воздушная линия электропередачи, информационная модель.

A. V. Burtsev, G. P. Fastiy, V. V. Yaroshevich

INFORMATION MODEL OF POWER TRANSMISSION LINE TO CONSTRUCT THE BIGDATA CONCEPT IN ELECTRIC POWER INDUSTRY

Abstract

The basic information model of an overhead transmission line for application in development of the big data system concept is given. Each block of the model is considered in detail, the prospects for its application are shown.

Keywords:

power transmission line, information model.

Составление информационной модели воздушной линии электропередачи (ВЛ) является необходимым условием для полноценной разработки концепции BigData в электроэнергетике, начатой ЦЭС КНЦ РАН в 2017 году. Согласно ГОСТ 34.003-90 [1], информационная модель — это модель объекта, представленная в виде информации, которая описывает существенные параметры и переменные величины объекта, связи между ними, входы и выходы объекта и позволяющая путём подачи на модель информации об изменениях входных величин моделировать возможные состояния объекта. Таким образом, составление модели объекта подразумевает начальное определение всех параметров ее компонентов и установление между ними связей.

Структура представленной модели основана на анализе 148 паспортов ВЛ классов напряжения от 35 до 150 кВ, предоставленных одной из энергокомпаний Мурманской области для изучения. Базовая информационная модель представлена на рис. 1. Рассмотрим более подробно каждый из блоков.

Блок «Воздушная линия электропередачи». Блок содержит базовую информацию по ВЛ: годы строительства; годы модернизации, если таковая производилась; год ввода в эксплуатацию; проектная организация; монтажная организация; эксплуатирующая организация; принадлежность к участку; класс напряжения; диспетчерское наименование; количество цепей. Такие показатели не влияют на дальнейшее поведение модели и используются лишь для справки.

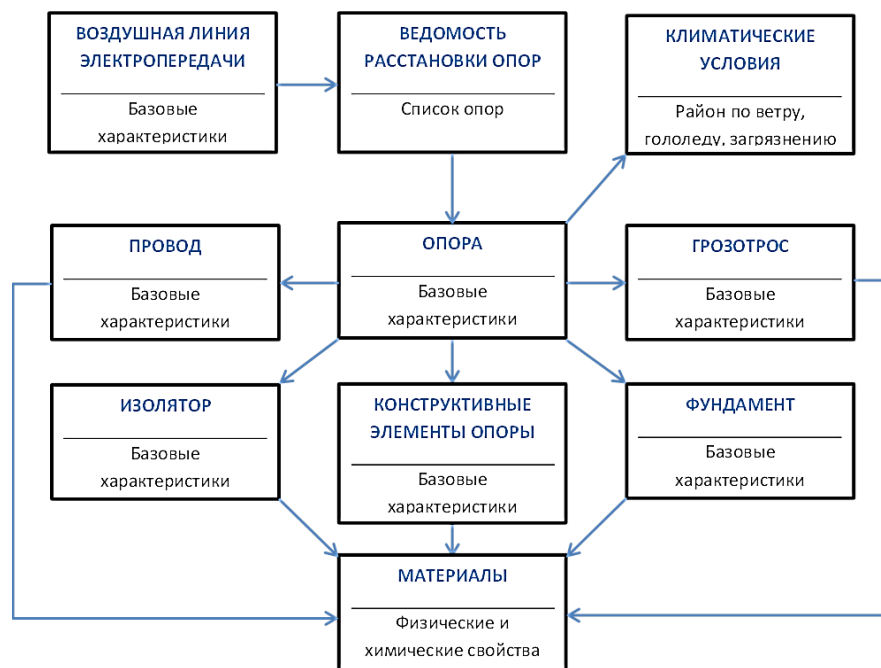


Рис. 1. Базовая информационная модель ВЛ

Fig. 1. Basic information model of the overhead power line

Блок «Климатические условия». В данном блоке содержится подробная информация по районам климатических условий по ветру, гололеду и загрязнению воздуха с привязкой к местности. Карты климатических условий постоянно меняются, соответственно, их учет в информационной модели необходим, т.к. показатели климатических условий учитываются при расчете механических нагрузок на опоры ВЛ и провода.

Блок «Ведомость расстановки опор». Блок является основным в информационной модели. Он содержит всю техническую и физическую информацию о ВЛ и служит основой для аналитических и технических расчетов состояний ВЛ. Блок состоит из списка опор ВЛ, формирующих ее трассу, с указанием географических координат опор, их тип, используемые марки проводов и грозотросов, типы изоляторов и их количество в гирляндах. Также указывается принадлежность опоры к цепи в случае применения одноцепной опоры в двухцепной линии. По географическим координатам вычисляется высота над уровнем моря для формирования рельефа трассы и присваиваются климатические параметры согласно Блоку «Климатические условия». Большинство указанных объектов уже должны быть определены. Поэтому необходимы связи рассматриваемого блока с блоками этих объектов, которые описаны ниже.

Блок «Опора». Данный блок отвечает за базовую информацию об опоре. К такой информации относится ее наименование, класс напряжения и тип: анкерная, промежуточная и др. К каждой опоре, описанной этим блоком, назначается список конструктивных элементов, содержащихся в блоке «Конструктивные элементы опоры».

Блок «Конструктивные элементы опоры». В этом блоке находится ряд элементов, из которых состоит конкретная опора. Рассмотрим эти элементы на примере железобетонной (ЖБ) опоры. Основным элементом ЖБ опоры является стойка. Все ЖБ стойки производятся по типовым проектам, имеют свои параметры и маркировку. При добавлении стойки в список элементов необходимо указать ее заглубление или марку фундамента, на который эта стойка будет установлена (рис. 2а).

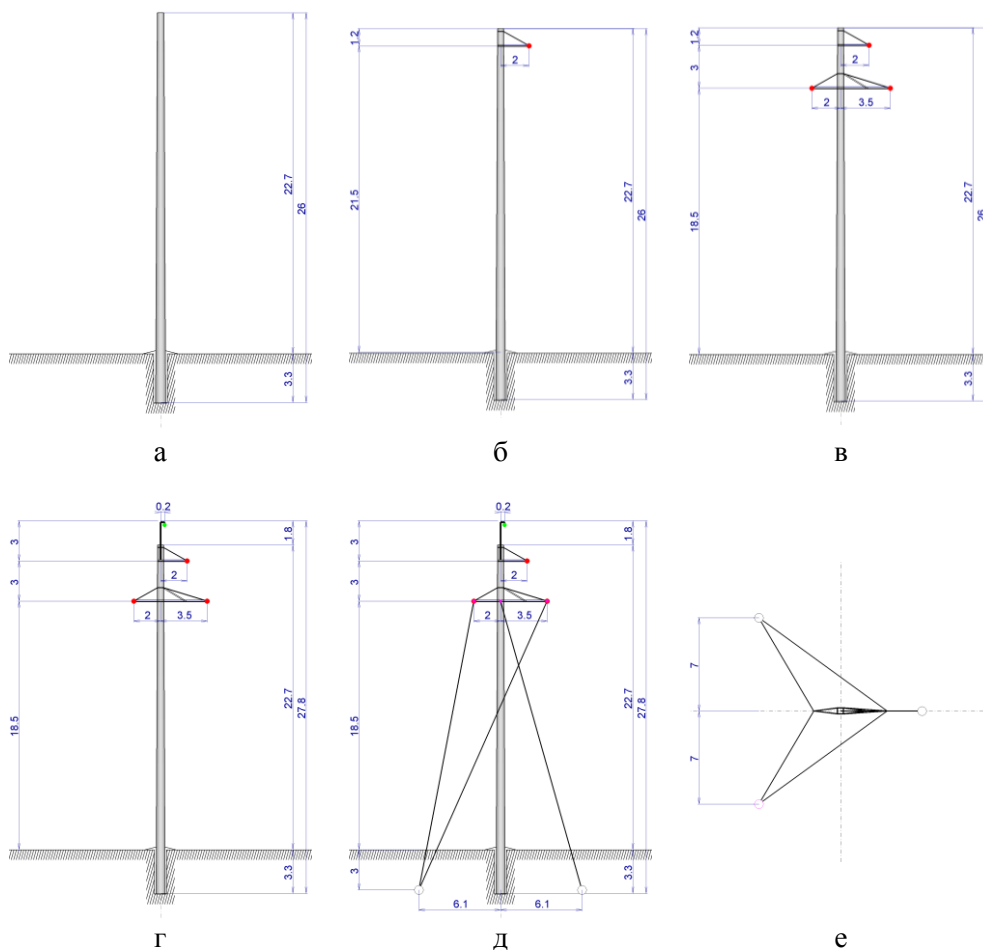


Рис. 2. Элементы железобетонной опоры и их размеры:
 а — стойка; б — траверса; в — одноцепное исполнение;
 г — тросостойка; д — оттяжки; е — оттяжки (вид сверху)

Fig. 2. Elements of reinforced concrete support and their dimensions:
 а — tower body; б — traverse; в — single-circuit execution;
 г — ground wire peak; д — guyed tower; е — guyed tower (top view)

На стойку крепятся траверсы, монтажные чертежи которых также описаны в типовых проектах. При добавлении траверсы в список элементов нужно указать высоту над уровнем земли, вынос от оси симметрии стойки,

вертикальный размер, место крепления поддерживающей арматуры, а также направление относительно оси ВЛ (рис. 2б). Как правило, на опоре три (рис. 2в) или шесть траверс для одноцепного или двухцепного исполнения соответственно, но встречаются опоры с большим числом цепей или специальные опоры, например ответвительные, где число траверс может достигать до девяти в двухцепном исполнении. На вершину стойки крепится тросостойка — элемент, удерживающий грозозащитный трос. Один из ее параметров — это высота (рис. 2г). Опора может поддерживаться оттяжками. Каждая оттяжка является отдельным конструктивным элементом и добавляется в список элементов индивидуально. К основным параметрам оттяжки можно отнести место крепления на стойке или траверсе, заглубление, расстояние от стойки опоры и направление относительно оси ВЛ (рис. 2д,е). Таким образом, набор конструктивных элементов опоры позволяет создать ее геометрическую и физическую модель, на основе которой держится вся информационная модель ВЛ.

Блоки «Провод» и «Грозотрос». Блоки содержат информацию о проводниках, применяемых в электроэнергетике. В качестве грозотроса применяют стальной провод, где диаметр стального сердечника несколько больше, чем диаметр наружных проволок (рис. 3а). В качестве фазных проводов используют, как правило, провода с комбинацией материалов: сталь в качестве материала сердечника; алюминий (рис. 3б) или бронза (рис. 3в) в качестве материалов внешних проволок. Поэтому в качестве необходимых данных для описания проводника требуется знать его состав — число проволок, их диаметр и материал для сердечника и внешней части. Также основным параметром проводника является электрическое сопротивление на единицу длины для расчета физических процессов и разрывное усилие для расчета механических нагрузок.

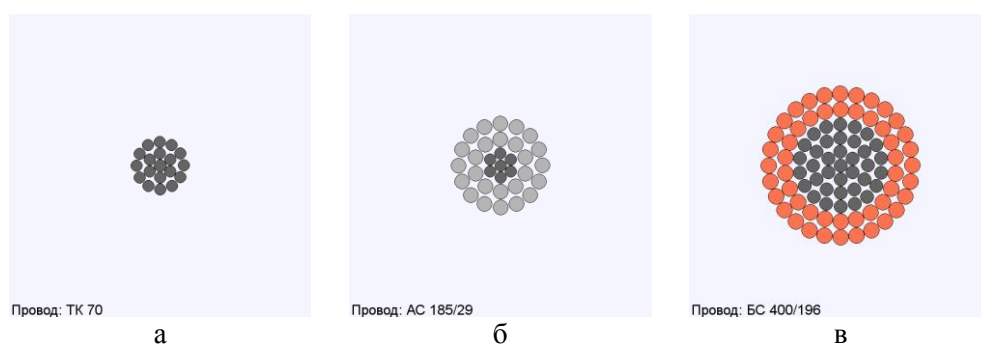


Рис. 3. Различные структуры проводников

Fig. 3. Various structures of conductors

Блок «Изолятор». Блок содержит основные параметры линейных изоляторов, применяемых на высоковольтных ВЛ. К таким параметрам относятся: минимальная механическая разрушающая нагрузка целого изолятора и его остатка, геометрические размеры, длина пути утечки и пробивные напряжения.

Блок «Фундамент». В основном этот блок содержит информацию о геометрических размерах и расходе бетона и металл для изготовления конкретной единицы изделия.

Блок «Материалы». В данном блоке содержится информация о материалах, которые используются для изготовления проводов, тросов, изоляторов, опор и т.д.

Основными материалами для изоляторов являются малощелочное стекло, электротехнический фарфор, кремнийорганическая резина. Эти материалы описываются следующими параметрами: плотность; прочность разрыва; теплоемкость; теплопроводность; электрическая прочность; тангенс угла диэлектрических потерь; удельное поверхностное сопротивление; удельное объемное сопротивление; диэлектрическая проницаемость.

Для проводов и тросов применяются следующие материалы: сталь, алюминий, бронза, медь. Провода могут состоять из нескольких материалов. Основные физические свойства материалов, которые применяются для проводов: температура плавления; удельная теплопроводность; удельная теплоёмкость; удельное сопротивление при 20° С; удельная электропроводность при 20° С; температурный коэффициент удельного сопротивления; температурный коэффициент линейного расширения.

Для изготовления опор согласно нормам технологического проектирования ВЛ применяются различные материалы: дерево, бетон, сталь и композит. Одним из основных элементов железобетонных опор является стойка, которая изготавливается из различного класса бетона например: В30, В40, В45 и т.д. Основными характеристиками бетона является: прочность, морозостойкость, водонепроницаемость.

Выводы

Разработанная информационная модель ВЛ включает в себя обширный набор параметров и условий, позволяющий описать в числовом виде практически любую линию электропередачи. Такая модель дает возможность проводить различные физические расчеты и анализ состояния ЛЭП в среде с большим объемом данных.

Литература

1. ГОСТ 34.003-90. Информационная технология (ИТ). Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения, ГОСТ от 27 декабря 1990 года № 34.003-90
2. Бурцев А. В., Ярошевич В. В., Фастий Г. П., Карпов А. С. Систематизация объектов электроэнергетики для построения концепции «BigData» на примере металлических опор воздушных линий. Труды Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 8. № 8-15. С. 61–69.

Сведения об авторах

Бурцев Антон Владимирович,

младший научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»,

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д.21А

Эл. почта: a.burtsev@tehnord.ru

Фастий Галина Прохоровна,

научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А,

эл. почта: fastiy@ien.kolasc.net.ru

Ярошевич Вера Васильевна,

научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А,

эл. почта: yaroshevich_vera@mail.ru

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.48-55

УДК 621.548 (470.21)

В. А. Минин

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПЕРИОДОВ И ПЕРИОДОВ ПРОСТОЯ ВЭУ
ПО ДЛИТЕЛЬНОСТИ НА СЕВЕРНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ
КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА**

Аннотация

По результатам многолетних наблюдений за скоростью ветра на ветроэнергетическом полигоне Кольского научного центра РАН, расположенного на северном побережье Кольского полуострова, выявлены особенности формирования длительности рабочих периодов ветроэнергетических установок (ВЭУ) и последующих периодов их простоя в зависимости от времени года и среднего уровня интенсивности ветра.

Ключевые слова:

энергия ветра, режимы работы ветроэнергетических установок (ВЭУ).

V. A. Minin

**DISTRIBUTION UNDER DURATION OF WORKING PERIODS AND IDLE PERIODS
OF WIND TURBINES IN THE NORTHERN COAST OF THE KOLA PENINSULA**

Abstract

According to the results of long-term observations of wind speed at the wind energy polygon of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, located on the northern coast of the Kola Peninsula, features of the formation of the duration of the working periods and idle periods of wind turbines depending on the time of year and the average level of wind intensity were revealed.

Keywords:

wind energy, operational modes of the wind turbines.

Прибрежные районы европейского Севера России располагают повышенным потенциалом ветровой энергии [1], характеризуемым среднегодовыми скоростями ветра 5–8 м/с на высоте 10 м от поверхности земли. Среди этих районов наибольший потенциал ветра имеет место на северном побережье Кольского полуострова, где соседствуют незамерзающее Баренцево море и холодная материковая часть суши. Перспективы применения здесь ветроэнергетических установок (ВЭУ) наиболее очевидны [2, 3].

При анализе возможностей использования энергии ветра наряду с данными о средних скоростях ветра и повторяемости скоростей большое значение имеют данные о возможной длительности периодов работы ВЭУ и периодов простоя (энергетических затиший).

Под рабочим периодом T_p понимается период времени, в течение которого скорость ветра больше минимальной рабочей скорости $v_{min p}$, но меньше максимальной рабочей $v_{max p}$, определяемой из условия обеспечения безопасности работы ВЭУ. Под периодом простоя T_{np} понимается время, в течение которого скорость ветра меньше $v_{min p}$ или больше $v_{max p}$. Суммарное время работы и простоя ВЭУ в течение года определяется через функцию повторяемости скоростей ветра $t(v)$ выражениями

$$\sum_{i=1}^{n_1} T_{pi} = T \int_{v_{min p}}^{v_{max p}} t(v) dv,$$

$$\sum_{i=1}^{n_1} T_{npi} = \left[\int_0^{v_{min p}} t(v) dv + \int_{v_{max p}}^{\infty} t(v) dv \right],$$

причем

$$\sum_{i=1}^{n_1} T_{pi} + \sum_{i=1}^{n_1} T_{npi} = \sum_{i=1}^{n_1} T_{pi} + \sum_{i=1}^{n_2} T_{npi} + \sum_{i=1}^{n_3} T_{npi} = T,$$

где $n_1 = n_2 + n_3$ — общее число рабочих периодов или периодов простоя ВЭУ за год; n_2 и n_3 — число периодов простоя соответственно при скорости ветра меньше $v_{min p}$ и больше $v_{max p}$; T — число часов в году.

Графически (рис. 1) $\sum_{i=1}^{n_1} T_{pi}$ представляет собой площадь под кривой повторяемости скоростей ветра, ограниченную ординатами $v_{min p}$ и $v_{max p}$. Сумма крайних (отсеченных) площадей есть суммарное время простоя ВЭУ.

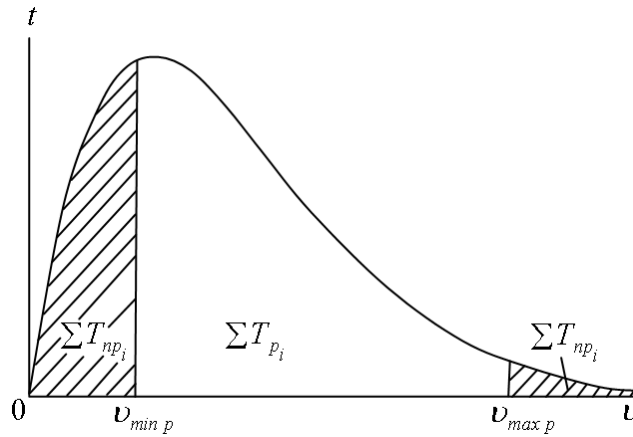


Рис. 1. Кривая повторяемости скоростей ветра

Fig. 1. Wind speed repeat curve

На рис. 2 и 3 в качестве примера приведены гистограммы повторяемости среднечасовых скоростей ветра в течение года и отдельных месяцев на ветроэнергетическом полигоне Кольского научного центра РАН на побережье Баренцева моря в районе пос. Дальние Зеленцы. Гистограммы построены по результатам обработки 10-летних непрерывных наблюдений за скоростью ветра на высоте 5 м от поверхности земли. Граничные скорости, отделяющие время работы ВЭУ от времени простоя, приняты равными: $v_{min\ p} = 4$ м/с, $v_{max\ p} = 30$ м/с.

В правой и левой частях гистограмм показаны значения $\sum_{i=1}^{n_l} T_{p_i}$ и $\sum_{i=1}^{n_l} T_{np_i}$ в процентах.

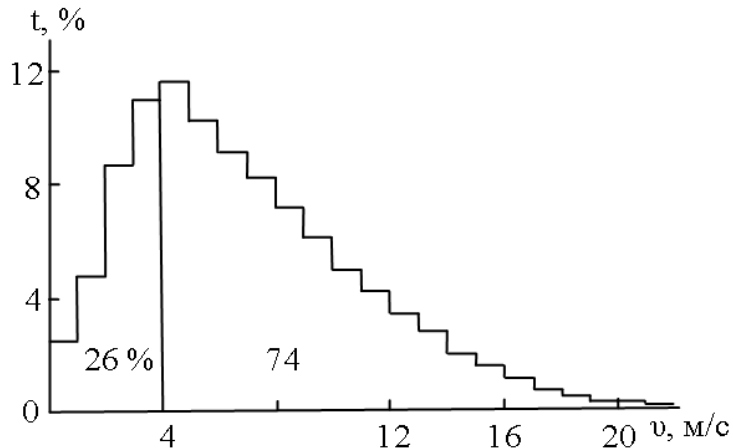


Рис. 2. Повторяемость среднечасовых скоростей ветра на ветроэнергетическом полигоне в пос. Дальние Зеленцы, по данным наблюдений за 1976–1987 гг.

Fig. 2. Repeatability of the average hourly wind speeds at the wind energy polygon in the Dalniye Zelentsy, according to observations for the years 1976–1987.

Из рис. 2 следует, что суммарное время работы ВЭУ в году может составить 74 % годового времени, время простоя — оставшиеся 26 %. В зимние месяцы (рис. 3) с ростом интенсивности ветра эта пропорция изменяется в сторону увеличения рабочего времени до 85–91 %, в летние — в сторону его уменьшения до 50–60 %.

Для анализа перспектив использования энергии ветра и определения возможных режимов работы ВЭУ недостаточно иметь лишь суммарные оценки возможного времени работы и простоя ВЭУ. Желательно также знать, из каких периодов складывается это время, каково их распределение по длительности, насколько часто периоды работы могут сменяться периодами простоя, наконец, какова максимальная длительность простоя. Лучшим исходными данными для получения этих сведений являются материалы непрерывной записи скоростей ветра, выполненных с помощью анеморумбографа.

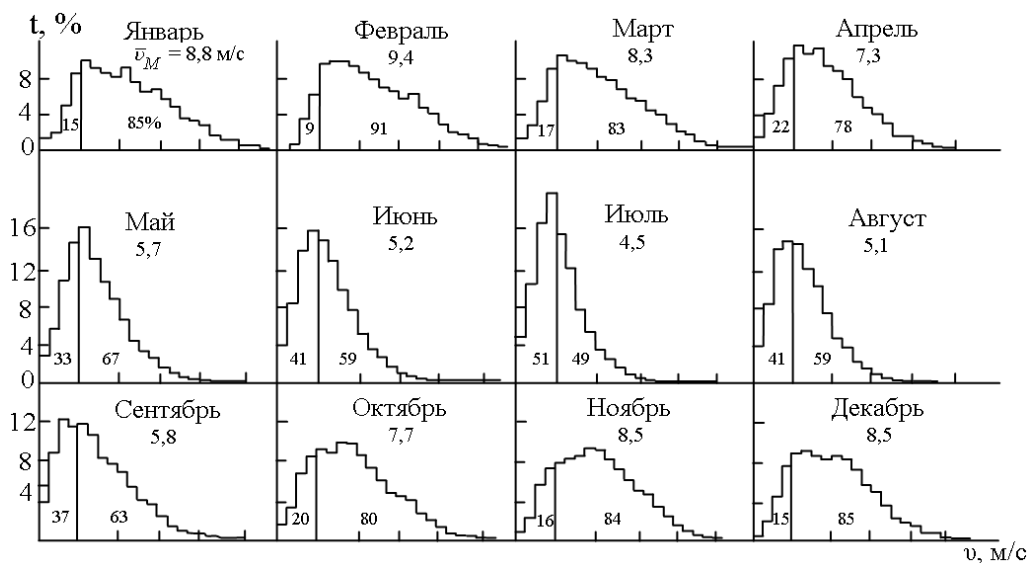


Рис. 3. Повторяемость среднечасовых скоростей ветра на ветрополигоне в пос. Дальние Зеленцы в различные месяцы года

Fig. 3. Repeatability of the average hourly wind speeds at the wind energy polygon in the Dalniye Zelentsy in different months of the year

На рис. 4 и 5 представлены результаты обработки 10-летних непрерывных наблюдений за скоростью ветра на ветроэнергетическом полигоне КНЦ РАН. При обработке информации прежде всего определялись отдельные элементы T_p и T_{np} . Группирование их по длительности позволило выявить, из чего складывается суммарное время работы или простоя ВЭУ и какова вероятность появления элемента заданной длительности.

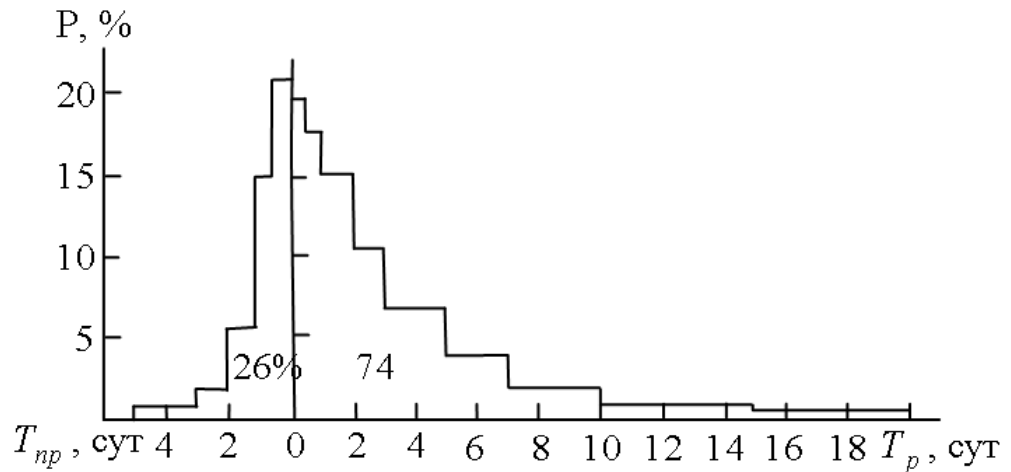


Рис. 4. Распределение периодов работы T_p и периодов простоя T_{np} ВЭУ по длительности в течение года
Ветрополигон в пос. Дальние Зеленцы, период наблюдений 10 лет, средняя скорость ветра $\bar{v} = 7,1$ м/с

Fig. 4. Distribution of working periods T_p and idle periods T_{np} of wind turbines by duration throughout the year

Правая часть графика на рис. 4, так же как и ранее на рис. 2, представляет собой суммарное время работы ВЭУ в течение года (74 % годового времени). Около 75 % этого времени приходится на периоды длительностью более суток, в том числе 40 % — более 3 суток. В левой части графика – суммарное время простоя ВЭУ. Около 70 % этого времени приходится на периоды длительностью менее суток, в том числе 41 % — менее 12 ч. Максимальная длительность затишья зафиксирована в летнее время и составили 123 ч (около 5 суток).

Анализ аналогичных данных по отдельным месяцам года (рис. 5) показывает, что в зимнее время длительность рабочих периодов возрастает, а периодов простоя падает. Так, в декабре-феврале 85–90 % рабочего времени приходится на периоды длительностью более суток, 55–70 % — более 3 суток, а около 40 % — более 5 суток. Периоды простоя ВЭУ на 70–90 % складываются из периодов менее 1 суток, в том числе 60–65 % — менее полусуток.

В ходе обработки исходной информации были вычислены средние значения длительности рабочих периодов \bar{T}_p и периодов простоя \bar{T}_{np} по каждому отдельному месяцу:

$$\bar{T}_p = \frac{\sum_{i=1}^{n_M} T_{pi}}{n_M}, \quad \bar{T}_{np} = \frac{\sum_{i=1}^{n_M} T_{npi}}{n_M},$$

где n_M — число рабочих периодов и периодов простоя за данный месяц.

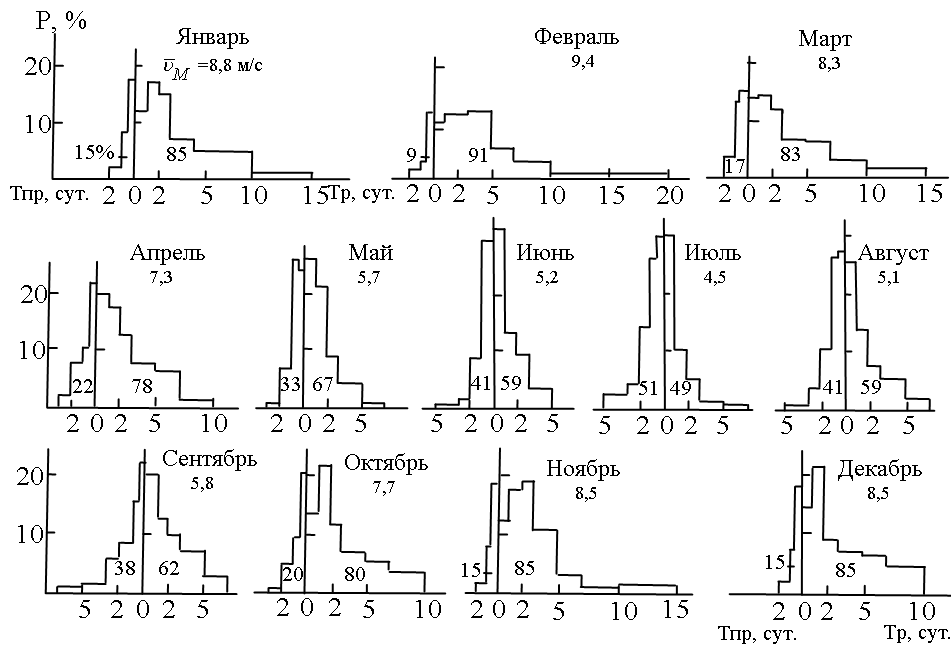


Рис. 5. Распределение периодов работы и периодов простоя ВЭУ по длительности в разные месяцы года Ветрополигон в пос. Дальние Зеленцы. Период наблюдений 10 лет

Fig.5. Distribution of working periods and idle periods of wind turbines by duration in different months of the year

Выполненные расчеты позволили установить связь средней длительности рассматриваемых элементов от среднемесячной скорости ветра \bar{v}_M .

При построении графиков (рис. 6а, б) использованы также данные непрерывных наблюдений по метеостанциям Мурманск, Кола и Пулозеро, располагающим более низким потенциалом ветра и позволившим охватить диапазон малых среднемесячных скоростей ветра. Из рис. 6а, б следует, что при скоростях ветра 8–11 м/с (зимние месяцы) длительность простоя ВЭУ составляет в среднем лишь 4–6 ч, а длительность работы — 30–60 ч и более. В летнее время ($\bar{v}_M = 4–5$ м/с) средняя длительность рассматриваемых периодов примерно одинакова — 10–15 ч.

Определенный интерес представляют данные о числе чередований элементов T_{pi} и $T_{пр}$ в течение месяца. Из рис. 6, в следует, что максимум числа чередований рабочих периодов и периодов простоя приходится на месяцы со средней скорости ветра около 4 м/с. Именно в эти месяцы текущее значение скорости чаще всего переходит через принятую границу $v_{min p}$, разделяющую элементы T_{pi} и $T_{пр}$. При меньших среднемесячных скоростях преобладают ветровые затишья, при больших — периоды работы ВЭУ. В зимние месяцы ($\bar{v}_M = 8–11$ м/с) на побережье Баренцева моря число чередований составляет в среднем около 15, в летние — до 30–40.

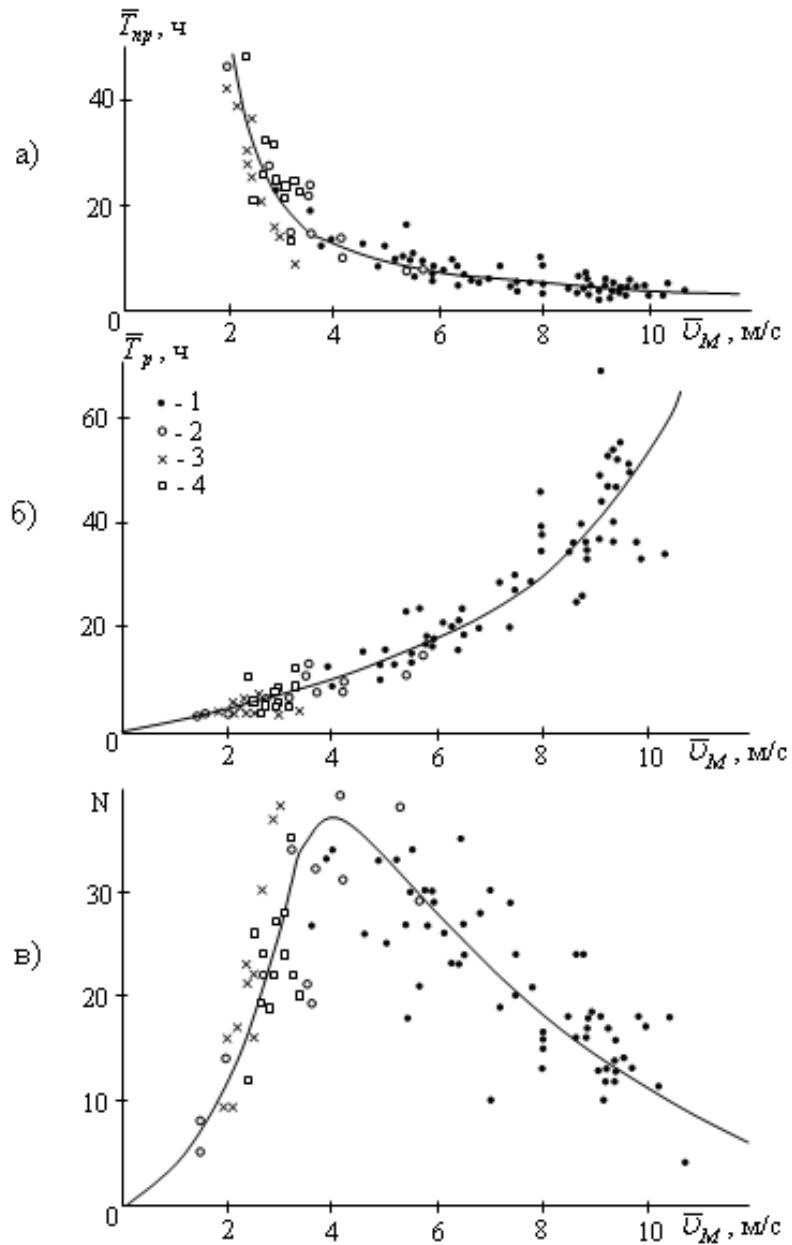


Рис. 6. Зависимость средней длительности периодов простоя (а), периодов работы ВЭУ (б) и числа чередований этих периодов (в) от среднемесячной скорости ветра:

1 — пос. Дальние Зеленцы; 2 — Мурманск; 3 — Кола; 4 — Пулозеро

Fig. 6. The dependence of the average duration of idle periods (a), working periods of wind turbines (б) and the number of alternations of these periods (c) on the average monthly wind speed:

1 — Dalniye Zelentsy; 2 — Murmansk; 3 — Kola; 4 — Pulozero

Выводы

1. На северном побережье Кольского полуострова на периоды активной работы ВЭУ приходится около $\frac{3}{4}$ годового времени и $\frac{1}{4}$ — на периоды простоя.

2. В зимние месяцы (декабрь-февраль) 85–90 % рабочего времени ВЭУ приходится на периоды длительностью более 1 суток, в том числе 55–70 % — более 3 суток, а периоды простоя на 70–90 % складываются из периодов менее 1 суток, в том числе 60–65 % — менее полусуток.

3. В холодное время года, когда среднемесячные скорости ветра составляют 8–11 м/с, число чередований рабочих периодов и периодов простоя ВЭУ составляет в среднем 15 в месяц, а в летнее время при среднемесячных скоростях 4–5 м/с этот показатель достигает 30–40 в месяц.

Литература

1. Минин В. А., Степанов И. Р. Ветроэнергетический кадастр европейского Севера СССР // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. 1983, № 1. С. 106–114.
2. Минин В. А., Дмитриев Г. С. Перспективы использования энергии ветра и малых ГЭС в удаленных районах Мурманской области. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2007. 97 с.
3. Минин В. А., Бежан А. В. Перспективы использования энергии ветра для теплоснабжения потребителей европейского Севера. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2009. 56 с.

Сведения об авторах

Минин Валерий Андреевич

Заведующий лабораторией энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», к.т.н.

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, Академгородок, д. 21А

Эл.почта: minin@ien.kolasc.net.ru

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.55-60

УДК 621.311+551.594.221:551.506

А. В. Бурцев, Г. П. Фастий, В. В. Ярошевич

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

Аннотация

В статье описано проведение эксперимента по определению полярности грозового разряда посредством двух одинаковых грозопеленгаторов. Результаты проведенного эксперимента дают предпосылки к объединению рассмотренных в статье систем грозопеленгации для получения более точной картины грозовой активности.

Ключевые слова:

грозопеленгатор, сеть грозопеленгации, молния, распределение разрядов молнии, Кольский регион

A. V. Burtsev, G. P. Fastiy, V. V. Yaroshevich

DEVELOPMENT OF MONITORING THUNDERSTORM ACTIVITY ON THE KOLA PENINSULA

Abstract

The article describes an experiment to determine the polarity of lightning by means of two identical lightning detectors. The results of the experiment give the prerequisites for combining the lightning detection systems considered in the article to obtain a more accurate picture of thunderstorm activity.

Keywords:

lightning detector, lightning detector network, lightning, lightning distribution, Kola Region

Введение

Система мониторинга грозовой активности на базе ЦЭС КНЦ РАН функционирует с 2013 года. За это время накоплено большое количество данных, позволяющих построить приблизительные карты распределения разрядов молний по территории Мурманской области. Помимо системы мониторинга, установленной в ЦЭС КНЦ, существуют и другие системы, в том числе международные, частично обеспечивающие покрытие территории Кольского региона. Основной задачей каждой подобной системы является увеличение точности регистрации места удара молнии и ее параметров. Сравнение работы различных систем грозопеленгации в этом регионе более подробно рассмотрено в [1], где проводится сопоставление сети грозопеленгации Blitzortung [2], работающей по принципу Time-of-Arrival [3], и однопунктового грозопеленгатора Voltek StormTracker, принимающего радиоволны, возникающих вследствие разряда молнии, в диапазоне очень низких частот (ОНЧ) с помощью ЕН-антенны [4]. Пример сопоставления одного из дней приведен на рис. 1.

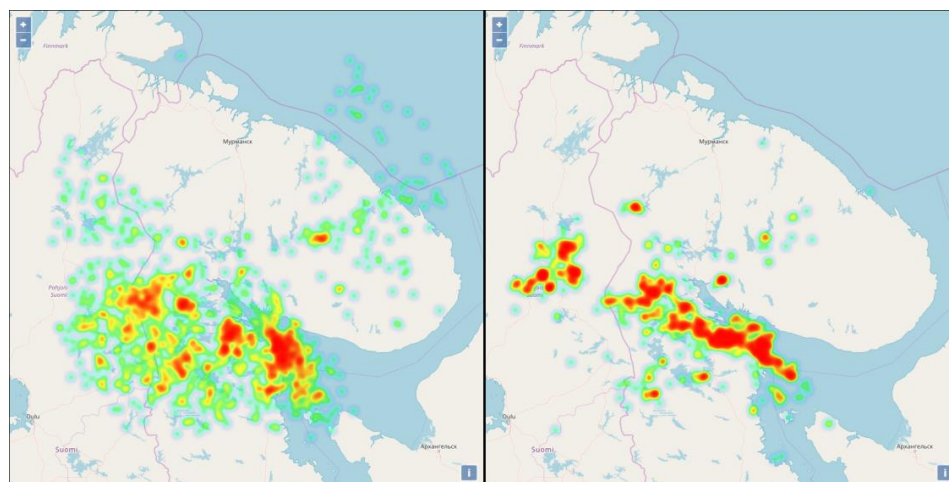


Рис. 1. Сопоставление распределения разрядов 09.08.2017:
StormTracker — слева; Blitzortung — справа

Fig. 1. Comparison of the lightning discharges distribution as of 08/09/2017:
StormTracker — left; Blitzortung — right

Для каждой рассмотренной системы регистрации грозовой активности можно отметить некоторые сильные и слабые стороны. Например, в отличие от сети Blitzortung, которая достаточно точно получает координаты разряда, но ограничена на территории Мурманской области ввиду малого числа регистраторов, грозопеленгатор StormTracker позволяет определять полярность и тип грозового разряда, но имеет ограниченный радиус действия. Объединение положительных сторон двух рассматриваемых систем даст более точное представление о грозовой активности в регионе. Для этого предлагается установить дополнительные грозопеленгаторы сети Blitzortung в некоторых городах Мурманской области для повышения точности определения координат грозовых разрядов, и дополнять полученные результаты данными о типе разряда и его полярности с регистраторов StormTracker. Для этого предложено провести эксперимент по определению полярности разрядов.

Проверка определения полярности разряда молнии

Для определения достоверности определения полярности разряда был проведен дополнительный эксперимент. Для этого был установлен идентичный детектор StormTracker в том же месте, что и ранее установленный. Оба детектора синхронизировались по времени. При таких условиях детекторы работали в течение нескольких месяцев. Исследование показало, что два идентичных детектора имеют различную чувствительность. Второй StormTracker определил значительно больше молнии, чем первый. Проверка событий показала, что были случаи, когда событие было обнаружено только одним детектором. Это мог быть как первый, так и второй детектор. Тем не менее, подавляющее большинство событий совпало во времени. На графиках молниевой активности, показанных на рис. 2, можно видеть сходство распределения событий во времени. Согласно представленным дням, исходные данные приведены в таблице 1.

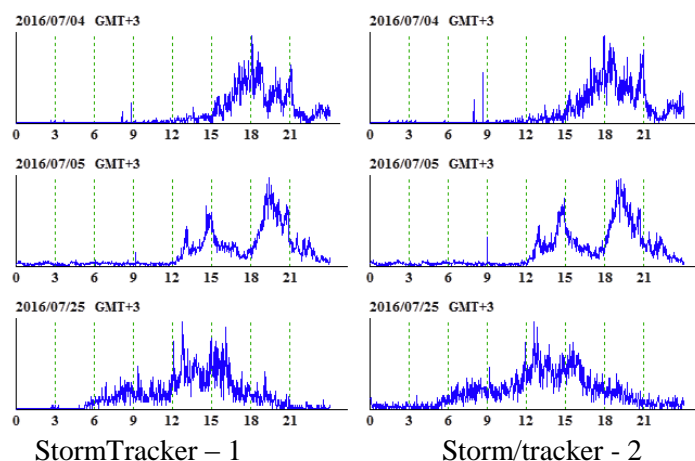


Рис.2. Графики грозовой активности с двух детекторов StormTracker за некоторые дни

Fig.2. Graph of thunderstorm activity from two detectors StormTracker for several days

Исходные данные для сравнения

Таблица 1

Table 1

Initial data for comparison

Дата		04.07.2016	05.07.2016	25.07.2016
Всего разрядов	1	3696	17265	3781
	2	4328	18331	6541
Всего шумов	1	140	6424	950
	2	305	9715	1910
IC+	1	1427	4961	1167
	2	2016	4970	1215
IC-	1	645	5745	1227
	2	1012	6084	4095
CG+	1	278	2085	478
	2	428	2621	399
CG-	1	1346	4474	909
	2	872	4656	832

Результаты синхронизации событий из двух детекторов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты синхронизации

Table 2

Synchronization results

Дата	04.07.2016	05.07.2016	25.07.2016
Всего событий с детектора 1	3836	23689	4731
Разрядов с детектора 1	3696	17265	3781
Шумов с детектора 1	140	6424	950
Всего событий с детектора 2	4633	28046	8451
Разрядов с детектора 2	4328	18331	6541
Шумов с детектора 2	305	9715	1910
Всего синхронизирован. событий	4868	30482	8940
Совпадение разрядов по времени	3311	12316	2474
Совпадение событий по времени	3577	21227	4226
Совпадение шумов	72	3965	365
Совпадение типа разряда	3024	10965	2056
Совпадение полярности	2856	10443	2215
Полных совпадений	2769	9092	1797
Учитываемые события	3311	12316	2474
Относительное совпадение полярности разрядов	86 %	85 %	90 %

В некоторых случаях один из детекторов распознавал событие как разряд, а второй детектор не мог идентифицировать то же событие и определял его как шум. В других случаях один из детекторов не мог распознать событие вообще, в то время как другой детектор мог идентифицировать это событие. Поэтому после синхронизации общее количество событий превышает максимальное количество событий от обоих детекторов.

Заключение

Наиболее интересна гроза от 05 июля 2016 года, которая проходила в непосредственной близости от детекторов. В этот день было зарегистрировано более 30 000 событий. Более 12 000 ударов молнии совпали по времени, из которых более 10000 совпадали в полярности. В любой из рассматриваемых дней относительное совпадение полярности разрядов составляет более 85 %. Такой показатель позволяет с уверенностью объединить системы обнаружения молнии, что повысит точность местоположений ударов и покажет их полярность.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Соколову Святославу Яковлевичу за предоставление информации по грозовой активности в Мурманской области из сети грозопеленгации Blitzortung.

Литература

1. Бурцев А. В., Фастий Г. П., Ярошевич В. В. Сопоставление результатов регистрации различных систем грозопеленгации в Кольском регионе // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика, вып. 2, 2018.
2. A worldwide, real time, community collaborative lightning location network: Blitzortung.org [электронный ресурс]. URL: <http://en.blitzortung.org> (дата обращения: 12.10.2018)
3. R. W. Klebesadel, W. Doyle Evans, E. E. Fenimore, J. G. Laros, and J. Terrell, Time-of-arrival location technique, Los Alamos Science, vol. 3, pp. 10–23, 1982.
4. A. D. Watt, VLF Radio Engineering, Vol. 14, International series of Monographs in Electromagnetic Waves. New York: Pergamon Press, Inc., 1967.

Сведения об авторах

Бурцев Антон Владимирович,

младший научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»,
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: a.burtsev@tehnnonord.ru

Фастий Галина Прохоровна,

научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А,
эл. почта: fastiy@ien.kolasc.net.ru

Ярошевич Вера Васильевна,

научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А,

эл. почта: yaroshevich_vera@mail.ru

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.60-67

УДК 621.311

Д. В. Куклин

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА**

Аннотация

Для выполнения измерений электрических характеристик грунта необходимо определить, какие параметры измерительного устройства являются критически важными. В статье определяются данные параметры.

Ключевые слова:

метод конечных разностей во временной области, заземлитель, диэлектрическая проницаемость, дисперсия.

D. V. Kuklin

**ESTIMATION OF PARAMETERS OF MEASUREMENT DEVICE FOR ELECTRICAL
SOIL CHARACTERISTICS**

Abstract

In order to perform measurements of electrical soil characteristics, it is necessary to determine what parameters of the measurement device are critically important. These parameters are determined in the article.

Keywords:

finite-difference time-domain method, grounding, permittivity, dielectric dispersion.

Введение

При измерении частотной зависимости диэлектрической проницаемости грунта было предложено использовать установки метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) [1; 2]. Помимо электромагнитного влияния между измерительными проводниками [2], существуют другие ограничения при измерениях на высоких частотах (несколько мегагерц). Так, например, внутренний импеданс измерительных пробников может существенно влиять на результаты измерений. Важно также знать, с какой точностью должны быть измерены ток и напряжение.

Оценка влияния входного импеданса измерительного пробника.

Оценку влияния входного импеданса пробника можно провести несколькими способами: сравнивая сопротивление (заземления) измерительных

электродов и входной импеданс пробника, проведя расчеты с установкой ВЭЗ более точным методом, используя опыт измерений.

Проведем данную оценку первым способом. Расстояние между измерительными электродами как правило составляет единицы метров [2] при применении установок ВЭЗ для измерений электрических характеристик грунта. Размер электродов должен быть в несколько раз меньше расстояния между ними (для того, чтобы их можно было считать точечными источниками при вводе тока в грунт и для исключения влияния электродов при измерении напряжения). Примем размер электродов равным 0,2 м (выбрано исходя из практики измерений удельного сопротивления грунта).

Оценим влияние активного входного сопротивления пробника. В высокоомном грунте с частотозависимыми электрическими характеристиками сопротивление электрода зависит от частоты (времени). Удельное сопротивление достигает наибольших значений на низких частотах (в таком случае можно использовать стационарное сопротивление). Примем удельное сопротивление 10 кОм·м за наиболее высокое (для предполагаемого измерительного устройства). Сопротивление вертикального электрода рассчитывается по формуле [3]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{4l}{d_0}\right), \quad (1)$$

где ρ — удельное сопротивление, l — длина электрода, d_0 — диаметр электрода.

Сопротивление электрода длиной 0,2 м и диаметром 10 мм в грунте с удельным сопротивлением 10 кОм·м приблизительно равно 35 кОм. Тогда, приняв, что суммарное сопротивление двух электродов (т.к. измерения часто проводятся между двумя одинаковыми электродами) должно составлять около одного процента от входного сопротивления пробника, входное сопротивление пробника должно быть выше примерно 7 МОм.

Оценим влияние входной емкости пробника. Пренебрежем емкостью электрода. На высоких частотах (порядка нескольких МГц) емкостное сопротивление пробника относительно мало и может влиять на результаты измерений. Но на высоких частотах мало также и сопротивление грунта, благодаря чему сопротивление электродов не настолько велико, чтобы емкость измерительного пробника существенно влияла на результаты (при условии, что применяются пробники с относительно малой входной емкостью). Примем наиболее высокое удельное сопротивление на частоте 4 МГц равным 1000 Ом·м (выбрано исходя из экспериментальных данных [4]). Для грунта с удельным сопротивлением 1000 Ом·м сопротивление электрода составляет около 3,5 кОм (двух — 7 кОм). Для достижения примерно той же степени влияния на результаты, что и при оценке активного сопротивления, достаточно, чтобы емкостное сопротивление было приблизительно в 10 раз выше активного сопротивления (заземления) электрода. Сопротивлению 70 кОм на частоте 4 МГц соответствует емкость, равная 0,57 пФ.

Оценим влияние входного импеданса пробника при его относительно низком значении путем расчетов с использованием метода конечных разностей во временной области [2]. Расчеты проводились с дипольной установкой (рис. 1). Проводники моделировались путем установки электрического поля вдоль узлов расчетной сетки в ноль. Поглощающие граничные условия — CPML (convolutional perfectly matched layer, [5]). Размер расчетной сетки — 0,25 м.

Частотозависимые параметры грунта заданы при помощи метода ADE [5]. Экспериментальные данные [4] аппроксимированы при помощи дебаевской релаксации [5]. Расчеты проведены для грунта со стационарным сопротивлением 9000 Ом·м.

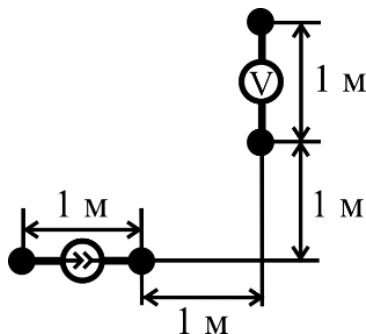


Рис. 1. Модель расчетов. Вид сверху.

Fig. 1. Calculation model. Top view.

Форма тока задана данной функцией [4]:

$$i(t) = \frac{i_{\max}}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{T}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{T}\right)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + 0,5\tau, \quad (2)$$

где $n = 10$, $T = 1,5 \cdot 10^{-5}$, $\tau = 4 \cdot 10^{-7}$, $\eta = 1$.

Время рассчитанного процесса — 400 мкс. После расчета напряжения, рассчитывается отношение напряжения к току в частотной области, откуда можно получить значения удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости [4]. Результат расчета показан на рисунке 2.

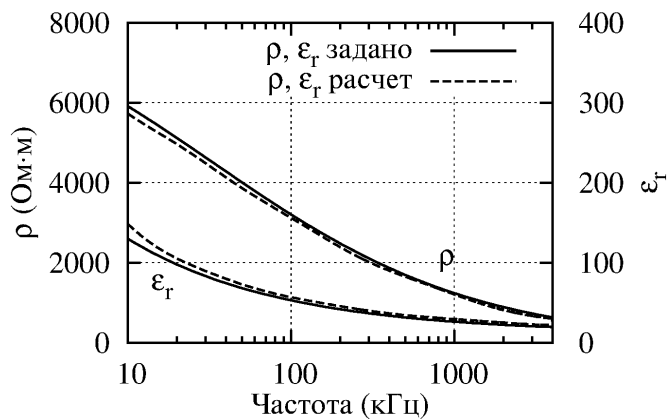


Рис. 2. Рассчитанные удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость

Fig. 2. Calculated resistivity and permittivity

Вначале было оценено сопротивление электрода в модели (рис. 3). В данных расчетах выбор расчетной сетки размером менее чем 0,25 м приведет к чрезмерно длительному времени расчета и неточностям, связанным с поглощающими граничными условиями. Поэтому трудно смоделировать измерительный электрод с достаточной точностью. В рассматриваемом случае было рассчитано сопротивление электрода при наиболее простом способе его моделирования: конец проводника (электрода) находится на границе с грунтом. Т.е. в данном случае (при данной расчетной сетке) невозможно точно смоделировать ту часть проводника, которая находится в грунте, поэтому моделируется некоторый эквивалентный реальному электрод, параметры которого определяются численными особенностями метода конечных разностей во временной области.

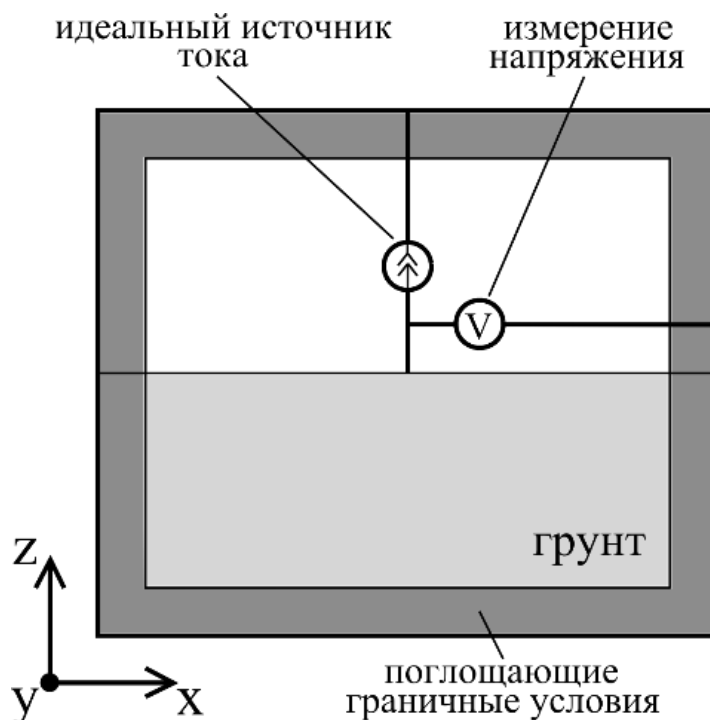


Рис. 3. Расчет сопротивления электрода

Fig. 3. Electrode resistance calculation

Заданный ток, а также рассчитанное напряжение показаны на рисунке 4. Параметры тока, заданные функцией (2) таковы: $n = 10$, $T = 1$, $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$, $\eta = 1$. Т.к. ток имеет практически ступенчатую форму и амплитуду, равную единице, значение напряжения численно равно значению сопротивления. Видно, что сопротивление такого электрода в несколько раз ниже, чем сопротивление реально используемого при измерениях электрода, поэтому стоит ожидать, что импеданс пробника, влияющий на результаты расчетов также будет в несколько раз ниже того, что был оценен ранее.

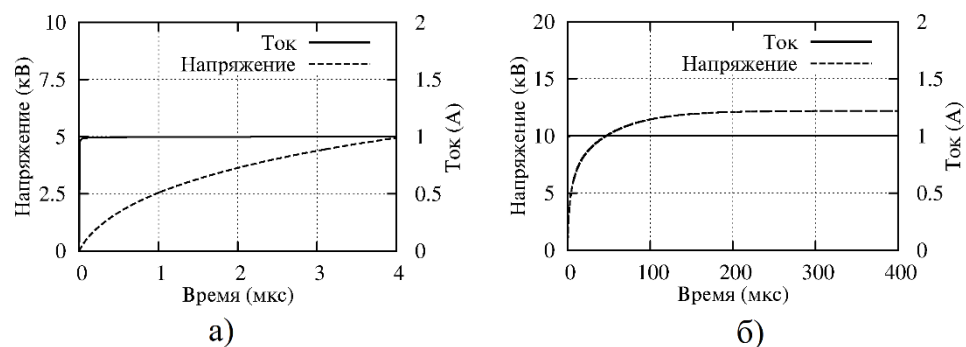


Рис. 4. Напряжение на электроде (и заданный ток через него)

Fig. 4. Calculated voltage (and current)

При измерениях, пробники, как правило, подключаются так, как показано на рисунке 5а. Для моделирования импеданса пробников, подключенных к осциллографу, используются конденсатор и резистор.

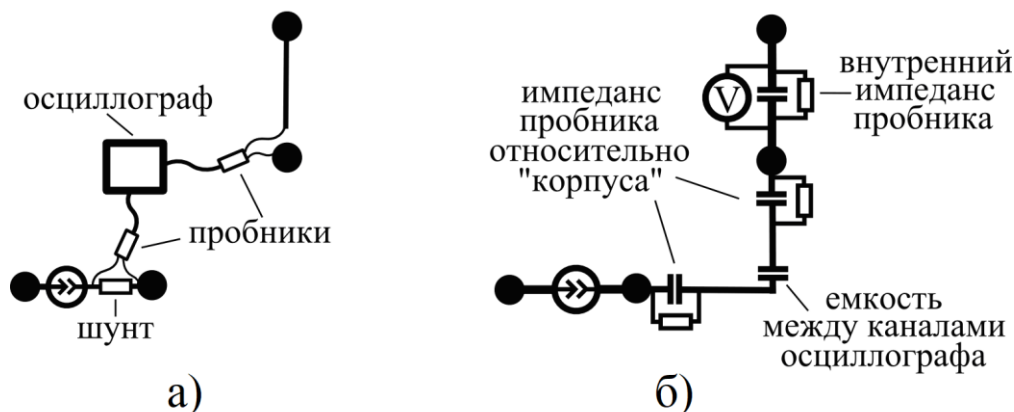


Рис. 5. а — схема измерений; б — модель расчетов

Fig. 5. a — measurement setup; b — calculation model

По отдельности рассмотрим влияние внутреннего импеданса пробника между его входами, влияние импеданса между входом и "корпусом" ("землей") пробника, влияние емкости между каналами осциллографа (в том случае, если применяется осциллограф с изолированными каналами). В первом случае моделируются только емкость и сопротивление пробника, подключенного к электродам, между которыми измеряется напряжение. Во втором — только емкость и сопротивление двух пробников относительно "корпуса" ("корпусы" пробников соединены проводом, т.е. моделируется применение осциллографа с электрически соединенными каналами). В третьем — только емкость между каналами осциллографа (моделируется применение осциллографа с изолированными каналами) при присоединении "корпуса" пробников к измерительным электродам (сопротивление относительно "корпуса" принято

равным нулю). Во всех случаях в качестве емкости применяется конденсатор емкостью 20 пФ и резистор сопротивлением 1 МОм.

Стоит отметить, что данные расчеты являются лишь оценочными, поскольку в них не определяется доля влияния внутренней емкости расчетной сетки (которая равна $3 \cdot \epsilon_0 \cdot \Delta$, где Δ — размер расчетной сетки [5]), не учитывается емкость электродов и др.

Результаты расчетов показаны на рисунке 6. Из рисунка видно, что импеданс пробника относительно "корпуса" оказывает существенно большее влияние на результаты, чем импеданс пробника при измерении напряжения. Применение осциллографа с изолированными каналами, очевидно, недостаточно для подобных измерений (если применяются пробники с низким сопротивлением относительно "корпуса"), с точки зрения обеспечения необходимой развязки между измерительными каналами.

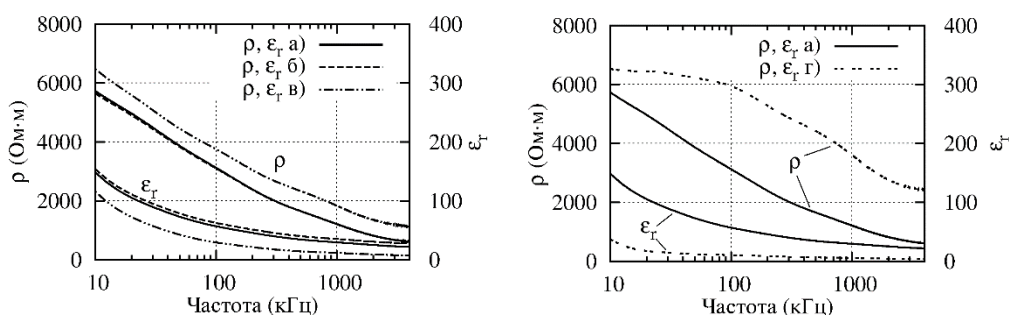


Рис. 6. а — результат расчета, показанный на рис. 2;
 б — влияние внутреннего импеданса пробника при измерении напряжения;
 в — влияние импеданса пробников относительно "корпуса";
 г — влияние емкости между каналами осциллографа

Fig. 6. a— calculation results for the model in Fig. 1 (same as those in Fig. 2);
 b — influence of the differential input impedance of the probe connected to the voltage rods;
 c — influence of the probe impedance between input and ground;
 d — influence of the capacitance between two channels of an oscilloscope

Характер данных результатов подтверждается опытом измерений. Так, например, можно отметить, что влияние емкости между входом и "корпусом" пробника является наиболее важным при измерениях (даже емкость порядка единиц пФ может влиять на результаты измерений). Также, из опыта измерений можно заключить, что применение осциллографа с изолированными каналами (без дополнительных мер, принятых к измерительным пробникам) не является достаточным.

Частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Чем меньше достаточная частота дискретизации АЦП измерительного устройства, тем проще само устройство. Оценим минимальное значение частоты дискретизации. Важно отметить, что в данном случае оценка выполняется путем расчетов и нет помех, которые присутствуют при измерениях; во время

измерений такое возможно только "при идеальных условиях". Т.е. при измерениях может потребоваться несколько более высокая частота выборки. Из результатов расчетов на рисунке 7 можно видеть, что в рассмотренном случае значение частоты дискретизации, равное 20 МГц, является достаточным.

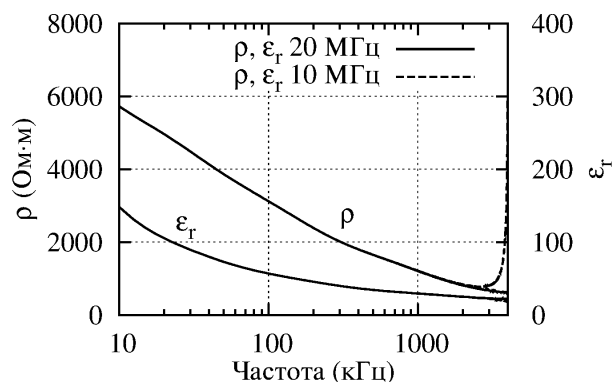


Рис. 7. Оценка достаточной частоты дискретизации

Fig. 7. Estimation of sufficient ADC sampling frequency

Оценка влияния ошибки, связанной с временным сдвигом между током и напряжением

При создании измерительного устройства необходимо знать, каковы требования к точности измерения разности фаз между током и напряжением (либо временного сдвига между ними, если применяется несинусоидальный источник).

Результаты расчетов для двух разных значений сдвига (и при его отсутствии) представлены на рисунке 8. Видно, что даже незначительный сдвиг может привести к заметной ошибке. Таким образом, разность фаз должна быть измерена с как можно большей точностью.

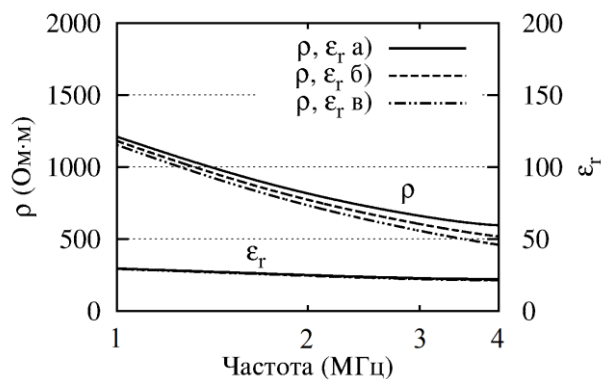


Рис. 8. Влияние сдвига по времени между напряжением и током:
а — без сдвига; б — сдвиг 2 нс; в — сдвиг 4 нс

Fig. 8. Influence of time shift between voltage and current:
a — no time shift; b — time shift equals 2 ns; c — time shift equals 4 ns

Прочие факторы

Стоит отметить и другие факторы, играющие важную роль при измерениях. Например, то, что существует компромисс между чувствительностью измерительного пробника, и влиянием помех (от генератора) на результаты измерений (даже с учетом экранирования). Также, важным является выбор формы напряжения (тока) генератора. При использовании импульсной формы, более простой в исполнении является генераторная часть, более сложной — измерительная; при применении генератора синусоидальной формы — наоборот.

Выводы

В статье проведены оценки влияния различных параметров измерительного устройства на результаты измерений, при использовании установок ВЭЗ. Предложено использование пробников с высоким входным сопротивлением (порядка единиц-десятков мегаом) и малой емкостью (единицы-доли пикофарад). Установлено, что без таких пробников применение осциллографа с изолированными каналами является недостаточным. Применение АЦП с частотой выборки в сотни мегагерц и более, вероятно, не является обязательным. Однако разность фаз (сдвиг между током и напряжением) должна быть измерена достаточно точно.

Литература.

1. Куклин Д. В. Определение параметров модели для выбора методики измерения удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости грунта / Д. В. Куклин // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. № 15. С. 56–61.
2. Kuklin D. Using pole-dipole array for measurements of frequency dependent soil electrical properties / D. Kuklin // Far East Con-2018 — International multi-conference on industrial engineering and modern technologies. 2018. Находится в печати.
3. Рябкова Е. Я. Заземления в установках высокого напряжения / Е. Я. Рябкова. М.: "Энергия", 1978. 224 с.
4. Visacro S. Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes / S. Visacro, R. Alipio // IEEE Transactions on Power Delivery. 2012. Т. 27. № 2. С. 927–935.
5. Taflove A. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method. Computational electrodynamics / A. Taflove, S. C. Hagness. Boston: Artech House, 2005.

Сведения об авторах

Куклин Дмитрий Владимирович,

научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А

эл.почта: kuklindima@gmail.com

О. Е. Коновалова

ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ РЕСПУБЛИКИ КОМИ И РОЛЬ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Аннотация

В статье дан анализ современного состояния энергетического хозяйства Республики Коми. Выявлены проблемы и узкие места энергоснабжения региона. Рассмотрены перспективы развития энергосистемы. Показана роль возобновляемой энергетики в энергохозяйстве региона. Приведены примеры строительства объектов на базе возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова:

Энергосистема, тепловые электростанции, газотурбинные электростанции, дизельные установки, ветроэлектрические станции, малые ГЭС, возобновляемые источники энергии, линии электропередачи.

O. E. Konovalova

THE POWER SUPPLY OF THE KOMI REPUBLIC AND THE ROLE OF RENEWABLE ENERGY IN THE ENERGY SYSTEM

Abstract

The article analyzes the current state of the energy sector of the Komi Republic. The problems and bottlenecks in the region's energy supply have been identified. Prospects for the development of the energy system are considered. The role of renewable energy in the energy economy of the region is shown. Examples of the construction of renewable energy sources are given.

Keywords:

The power system, thermal stations, gas turbine stations, diesel plants, wind farms, small hydropower plants, renewable energy sources, power lines.

Республика Коми — одна из северных областей России. Ее территория составляет 816,8 тыс. км². Численность населения на 01.01.2018 г. — 840,87 тыс. человек, из них 78,1 % проживает в городах, а 21,9 % в сельской местности [1]. На территории Республики насчитывается 6 городов и 14 муниципальных районов. Столица Республики — город Сыктывкар с численностью населения 260,82 тыс. чел. расположен на юге. Северная часть территории вместе с городом Воркута входит в Арктическую зону РФ.

Энергосистема Республики Коми представляет собой единый энергетический комплекс, который объединяет 6 крупных электростанций, вырабатывающих 97 % электроэнергии и ряд электростанций малой мощности, на долю которых приходится 3 % выработки. Всего здесь насчитывается 1356 электростанций (включая дизельные электростанции и автономные резервные источники электропитания) общей установленной мощностью 2,48 гигаватт [2].

Энергосистема Республики Коми входит в состав Объединенной энергосистемы Северо-Запада России и имеет связи с энергосистемами Архангельской и Кировской областей. Она состоит из пяти энергорайонов: Воркутинского, Интинского, Печорского, Ухтинского и Южного, соединенных системообразующими воздушными линиями (ВЛ) 220 кВ протяженностью 930 км (рис. 1). По двум ВЛ осуществляется электроснабжение нефтедобывающих районов севера Республики Коми и Ненецкого автономного округа.

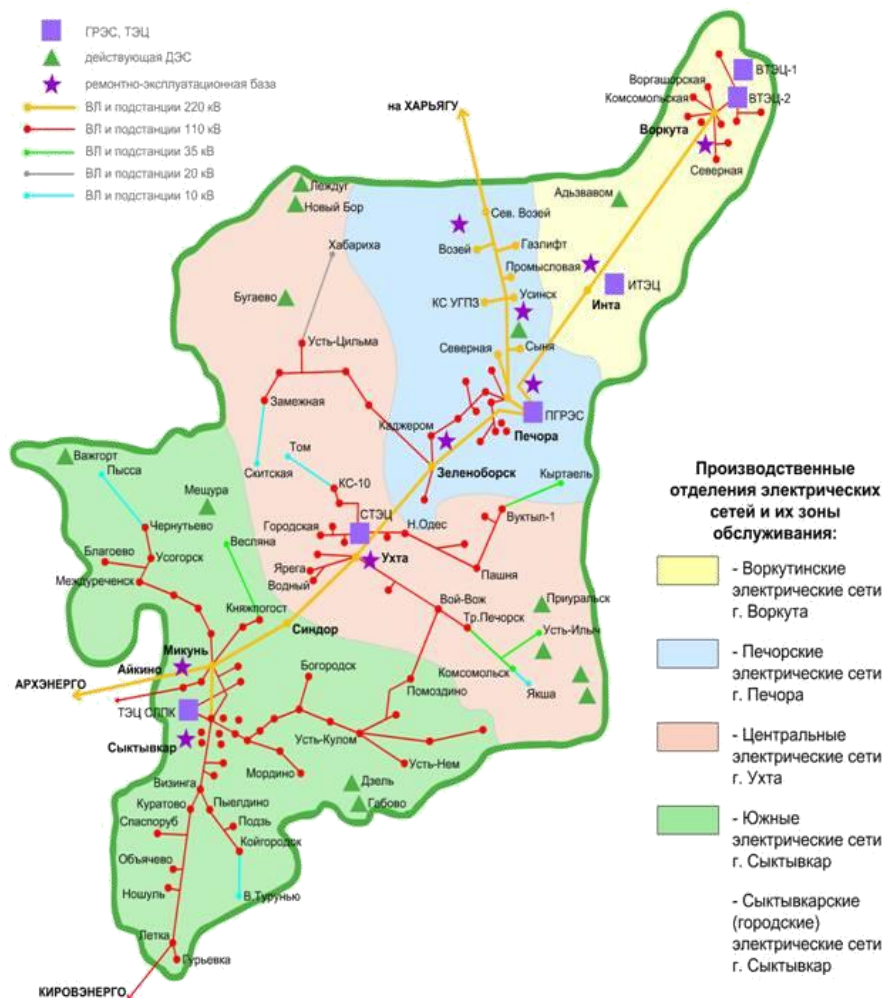


Рис. 1. Схема электроснабжения потребителей Республики Коми [3]

Fig. 1. Power supply scheme of the Komi Republic consumers [3]

Энергосистема Республики Коми на сегодняшний день является избыточной по электрической мощности: резерв составляет около 35 %, однако из-за слабых электрических связей с Архангельской и Кировской областями значительная часть мощности (около 400 МВт) Печорской ГРЭС заперта в северной части энергосистемы, и нет возможности ввода шестого энергоблока станции мощностью 210 МВт. При этом Южный энергоузел является дефицитным как по электро-, так и по теплоэнергии. Основным потребителем южного энергоузла является столица республики — г. Сыктывкар. От 55 % до 80 % нагрузки Южного энергоузла обеспечивает ТЭЦ ОАО "Монди Сыктывкарского лесопромышленного комплекса" ("Монди СЛПК") и от 20 % до 45 % передается из центрального энергоузла по ВЛ-220 кВ Ухта – Микунь [2].

В табл. 1. приведены основные электростанции, их установленная мощность и принадлежность, а на рис. 2. вырабатываемая ими электроэнергия в % по состоянию на 2014 год.

Таблица 1

Основные существующие электростанции энергосистемы Республики Коми [2]

Table 1

The main existing power plants of the power system of the Republic of Коми [2]

Собственник электростанции	Тип электростанции	Наименование электростанции	Установ. мощн. МВт	Вид основного топлива
филиал «Коми» ОАО «Волжская ТГК»	ТЭЦ	Интинская ТЭЦ	18	Уголь
		Сосногорская ТЭЦ	377	Газ
ООО «Воркутинские ТЭЦ»	ТЭЦ	Воркутинская ТЭЦ-1	25	Уголь, мазут
		Воркутинская ТЭЦ-2	270	Уголь
ОАО «Монди СЛПК»	ТЭЦ	ТЭЦ ОАО «Монди СЛПК»	541	Газ
Филиал ОАО «Интер РАО - Электрогенерация»	ГРЭС	Печорская ГРЭС	1060	Газ
ООО «Газпром трансгаз Ухта»	ЭСН КС (электростанции собственных нужд)	ЭСН КС-43 «Гагарацкая»,	9	Газ
		ЭСН КС-44 «Воркутинская»	9	
		ЭСН КС-45 «Усинская»	10,78	
		ЭСН КС-46 «Интинская»	9	
		ЭСН КС-47 «Сынинская»	9,24	
		ЭСН КС-48 «Чикшинская»	10,78	
		ЭСН КС-49 Малоперанская»	10,78	
		ЭСН КС-3 «Вуктыльская»	12	
		ЭСН КС-10 «Ухтинская»	10,8	
		ЭСН КС-12 «Микуньская».	9	
		ТЭЦ	Усинская ТЭЦ	
АО «Воркутауголь»	газопоршневая теплоэлектростанция (ГПТЭС)	ГПТЭС № 1, № 2 АО «Воркутауголь»	17,39	Газ
ООО «Енисей»	Газопоршневая электростанция	ГПЭС ООО «Енисей»	6,5	Газ
ООО Республиканская генерирующая компания»	ДЭС	ДЭС ООО «РГК»	16,8	Дизтопливо
Филиал ПАО «МРСК Северо-Запада» «Комиэнерго»	ДЭС	Дизельные станции (резервные)	31,4	Дизтопливо
ОАО «Российские железные дороги»	ДЭС	Дизельные станции	7,86	Дизтопливо
ООО «Биоэнергетическая компания»	ТЭЦ	Мини-ТЭЦ ООО «БК»	4,8	
Итого:			2488,13	

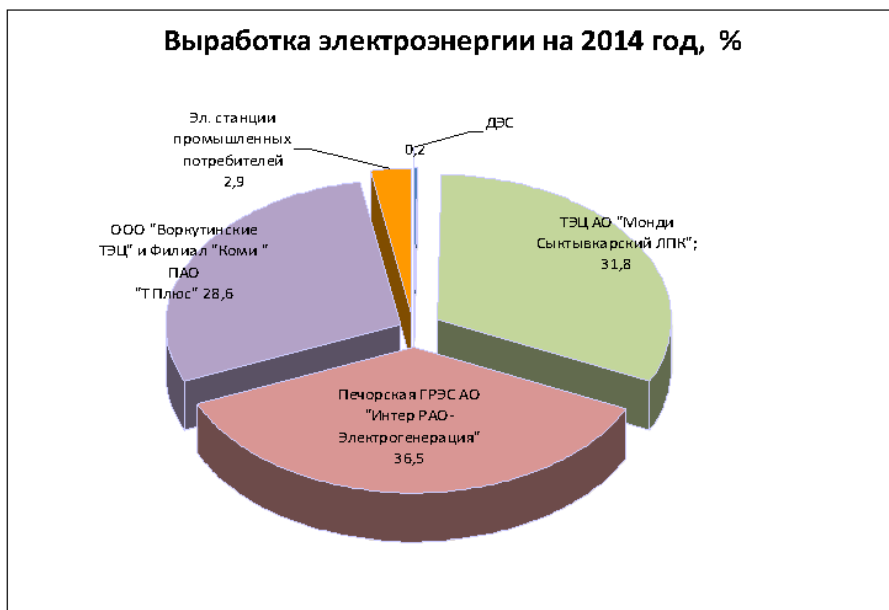


Рис. 2. Структура производства электроэнергии электростанциями Республики Коми [2]

Fig. 2. The structure of the production of electricity by power plants of the Republic of Komi [2]

В 2014 году всеми электростанциями Республики Коми было произведено 9,92 млрд кВт·ч электроэнергии, в 2017 году эта цифра составила 9,73 млрд кВт·ч.

Основная доля в структуре выработки электроэнергии приходится на Печорскую ГРЭС и ТЭЦ ОАО "Монди СЛПК" — более 60 %, а также Интинскую, Сосногорскую и Воркутинские ТЭЦ — 28,6 %. Дизельные электростанции вырабатывают 0,2 % электроэнергии, обеспечивая наиболее удаленных потребителей — 67 сельских населенных пунктов, в которых проживает 10,7 тыс. чел. При этом себестоимость электроэнергии, производимой ДЭС, по данным Службы по тарифам Республики Коми в декабре 2012 г. достигала 24,4 руб/кВт·ч (ООО «РГК») и 31,8 руб/кВт·ч. (ОАО «РЖД») при средней по республике стоимости электроэнергии — 3,2 руб/кВт·ч. [4].

Республика Коми является старейшим нефте- и газодобывающим регионом. Нефтегазовый комплекс представлен нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей и газовой промышленностью. В настоящее время на месторождениях углеводородного сырья работают 23 компании. Крупнейшие из них ООО «ЛУКОЙЛ-Коми», ООО «Енисей», ООО «РН-Северная нефть», ЗАО «Печоранефтегаз», ООО «ЛУКОЙЛ-Ухтанефтепереработка», АО «Транснефть-Север». Переработка нефти и газа производится в Ухте и Усинске.

Добычей угля общей производственной мощностью 14 млн т в год занимаются АО «Воркутауголь» и АО «Шахта «Интауголь». До 45 % добытых и произведенных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) вывозится из Республики Коми, 55 % — потребляется в экономике региона.

Основные центры деревообработки расположены в г. Сыктывкар и Сыктывдинском, Княжпогостском, Усть-Вымском районах.

Все эти предприятия и являются основными потребителями электроэнергии. Структура потребления электроэнергии представлена на рис. 3 [2].

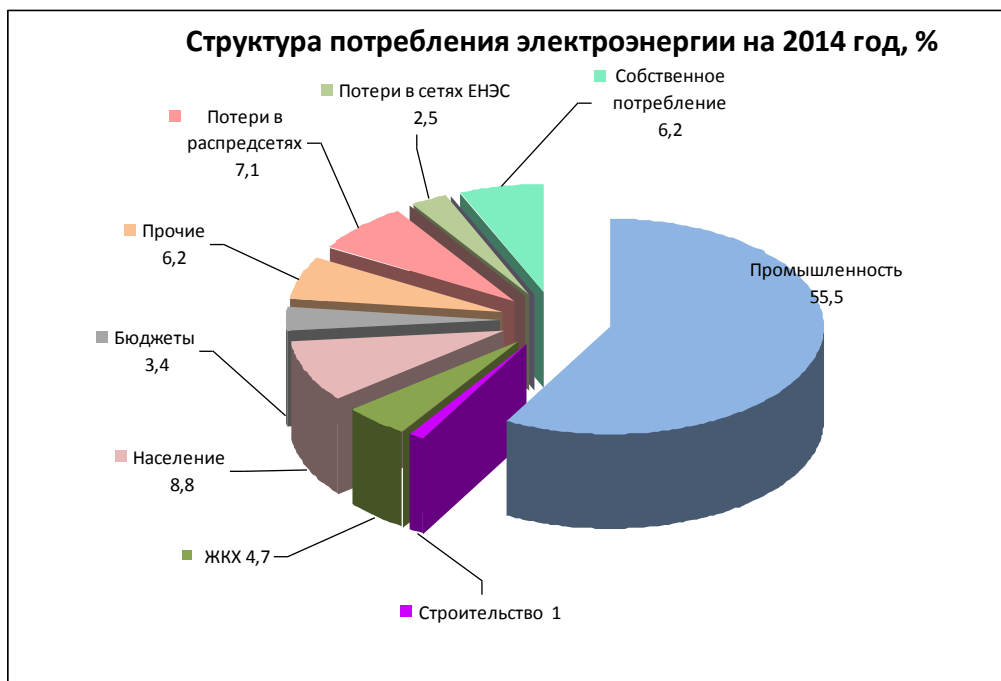


Рис. 3. Структура потребления электроэнергии в энергосистеме Республики Коми

Fig. 3. Structure of electricity consumption in the power system of the Republic of Коми

В 2014 году общее потребление электроэнергии составляло 8,95 млрд кВт·ч, а в 2017 году по отчетным данным операционной зоны Коми РДУ — 9,03 млрд кВт·ч.

Также на территории Республики ведут свою деятельность энергетические предприятия: филиал ОАО «МРСК Северо-Запада» «Комиэнерго», филиал «Коми» ОАО «Волжская ТГК», филиал ОАО «Интер РАО — Электрогенерация» «Печорская ГРЭС», занимающиеся производством, передачей и распределением электро- и теплоэнергии.

Централизованное теплоснабжение крупных населенных пунктов осуществляется от ТЭЦ и котельных:

- филиала «Коми» ПАО «Т Плюс» (г. Ухта, г. Сосногорск, г. Сыктывкар, г. Инта);
- ООО «Воркутинские ТЭЦ» (г. Воркута);
- АО «Монди СЛПК» (Эжвинский район г. Сыктывкара);
- филиала «Печорская ГРЭС» АО «Интер РАО — Электрогенерация» (г. Печора).

Так, в 2017 году Филиалом «Коми» ПАО «Т Плюс» и ООО «Воркутинские ТЭЦ» было произведено 5,3 млн Гкал [5]. Структура отпуска тепловой энергии от электростанций и котельных филиала «Коми» ПАО «Т Плюс», ООО «Воркутинские ТЭЦ» и Печорской ГРЭС основным группам потребителей представлена на рис. 4. К тому же около 700–800 тыс. Гкал. теплоэнергии отпускается ежегодно тепловой станцией АО «Монди СЛПК» для теплоснабжения Эжвинского района г. Сыктывкара.

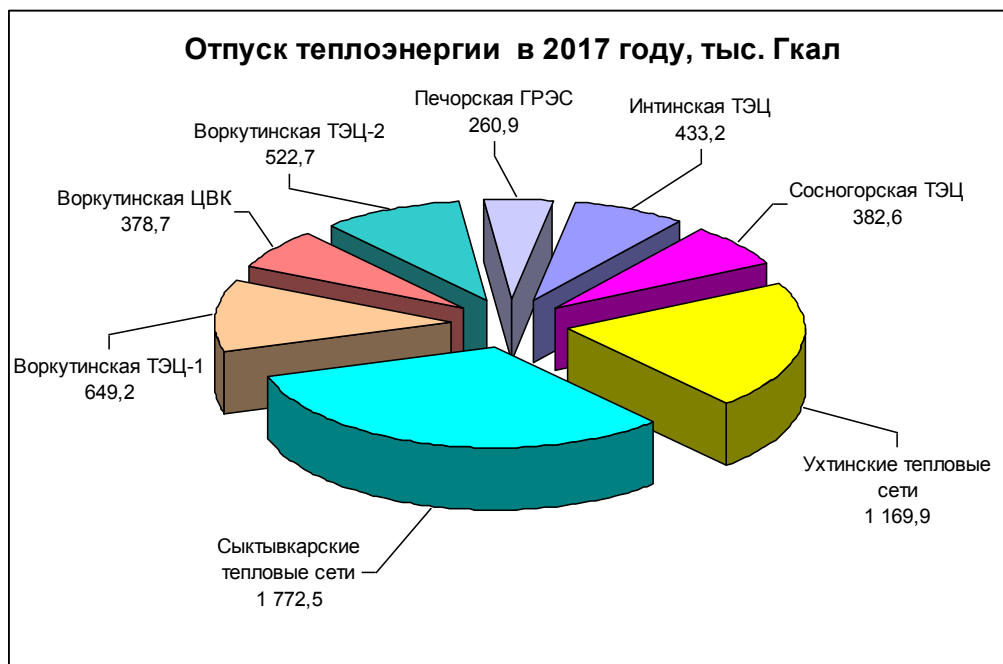


Рис. 4. Структура отпуска теплоэнергии основным потребителям

Fig. 4. Structure of heat supply to main consumers

На территории сельских поселений действуют около 360 котельных общей установленной мощностью — 757 Гкал/ч. Из них мелкие установки, единичной мощностью до 3 Гкал/ч, составляют 89 % от общего количества котельных. На большинстве котельных (311) в качестве топлива используется уголь, около 40 котельных используют мазут и газ, а остальные древесину [4]. Среди отопительных котельных в сельской местности доля неэффективных мощностей (с ценами производства, превышающими предельный уровень тарифа) достигает 61 % (218 ед. от общего числа).

В целом электрические станции Коми энергосистемы характеризуется высокой изношенностью оборудования. Большинство из них эксплуатируется долгие годы (40–70 лет). Во многом из-за этого в 2015–2016 годах происходили многочисленные аварии на Воркутинской ТЭЦ-2 чуть не приведшие к отключению двух энергорайонов (Воркутинского и Интинского) от электро- и теплоснабжения. Благодаря вмешательству комиссии Ростехнадзора и замминистра энергетики этого удалось избежать. В настоящее время количество аварийных отключений на станции сократилось.

Степень износа котельного оборудования в отопительных котельных колеблется от 50 до 90 %. Отсутствие приборов учета и регулирования в сочетании с неоптимальной загрузкой большинства котельных (присоединенная нагрузка составляет в среднем 62 %) приводит к значительному перерасходу топлива. Необходима модернизация существующего оборудования или строительство новых котельных на газе с закрытием неэффективных и отработавших свой срок.

Дальнейшее развитие энергетической системы Республики Коми возможно путем решения проблем, копившихся десятилетиями:

1. Строительства линий электропередачи ВЛ 220 кВ Печорская ГРЭС – Ухта – Микунь (проектирование сейчас ведется, строительство участка Печорская ГРЭС – Ухта намечено на 2019 г.), Печорская ГРЭС – Усинск.

2. Привлечения инвестиций на реализацию проектов модернизации и реконструкции объектов энергетики и сетевого строительства:

- модернизация генерирующего оборудования и завершение строительства шестого энергоблока Печорской ГРЭС;
- реконструкция Воркутинской ТЭЦ-2;
- увеличение генерирующей мощности ОАО "Монди Сыктывкарский ЛПК" на 80 МВт (реализация проекта "Степ");
- реконструкция подстанций и линий электропередач.

3. Строительства новых энергетических объектов для обеспечения роста промышленного производства и улучшения электроснабжения:

- ТЭЦ общего пользования в г. Сыктывкаре мощностью 130 МВт;
- Усинской ТЭЦ мощностью 100 МВт (уже введена в строй в 2016 г. с газотурбинными установками (ГТУ), созданными в России на базе авиационных двигателей);
- ТЭЦ Сосногорского глиноземного завода мощностью 52 МВт;
- ТЭЦ Троицко-Печорского лесопромышленного комплекса мощностью 150 МВт;
- ТЭЦ Ярегского нефтетитанового комплекса мощностью 100 МВт (построено 75 МВт, ввод 4 энергоблока ожидается в 2022 г.);
- 7 электростанций собственных нужд (ЭСН) на базе автоматизированных газотурбинных электростанций в контейнерном исполнении для газотранспортной системы "Ямал – Европа" суммарной мощностью 118-120 МВт к 2025 г. в рамках строительства газопровода "Бованенково – Ухта" (Первые две нитки уже построены, а строительство III, IV, V и VI ниток ожидается в 2017–2031 годах.) [6];

4. Реконструкции и модернизации объектов по передаче тепловой энергии:

- с применением новых технологий — строительство блочно-модульных автоматизированных котельных;
- за счет повышения эффективности использования газа на газовых котельных (перевод Воркутинской центральной водогрейной котельной и Воркутинской ТЭЦ-2 на газ ориентировочно в 2018–2020 гг.);
- перевода котельных в мини-ТЭЦ.

Другим направлением развития электроэнергетики может быть:

- использование возобновляемых энергоресурсов (древесного топлива, отходов лесопереработки);
- строительство и ввод в эксплуатацию малых ГЭС и ВЭС [7, 8];
- использование попутного газа, строительство электростанций с применением газодизельных установок на капируемом (удаляемом в атмосферу) метане на шахтах;
- использование новых угольных генерирующих мощностей с применением современных экологически чистых технологий сжигания угля.

Потенциал возобновляемой энергетики Республики Коми, включая ветро-, гидроэнергию, а также дрова, отходы деревообработки и биогаз составляет 650 тыс. т у.т. в год [9]. Сегодня освоено менее половины.

Центральные и южные районы республики располагают значительными объемами неиспользуемого древесного биотоплива — около 300 тыс. т у. т. Там сосредоточены предприятия по лесозаготовке и деревообработке.

В рамках программы «Использование низкосортной древесины и отходов лесопереработки в качестве топлива для производства горячей воды, тепловой и электрической энергии» руководством области начата реализация "пилотных" проектов по реконструкции коммунальных котельных с переводом на биотопливо. На первом этапе ставится задача произвести частичную замену угля на топливные брикеты.

По данным генерального директора АО «Коми тепловая компания» сейчас в Коми работает 60 брикетных котельных и 5 котельных на пеллетах, 90 % производимых в регионе брикетов поступают на котельные «Коми тепловая компания». В ближайшие годы компания планирует в сельских населенных пунктах:

- перевод на биотопливо 12 котельных;
- перевод 14 котельных на газ;
- техническое перевооружение 25 котельных.

Крупные предприятия лесопромышленного комплекса Республики Коми такие как ОАО «Монди Сыктывкарский ЛПК», ЗАО «Жешартский фанерный комбинат», ООО «СевЛесПил», ОАО ЛПК «Сыктывкарский ЛДК», ЗАО «Леском», ООО «Лузалес» около 70 % отходов деревообработки используют в качестве топлива для выработки энергии на своих электростанциях.

С 2016 года ОАО «Монди Сыктывкарский ЛПК» ведет строительство нового энергоблока на своей ТЭЦ, ввод в эксплуатацию которого планируется в 2019 году. В состав энергоблока входит паровой котел производительностью 250 т/ч, с параметрами пара — давление 9,2 МПа, температура 490 °С, работающий на кородревесных отходах, и паровая турбина с генератором установленной мощностью 80 МВт. Это позволит увеличить объем утилизации древесных отходов.

В 2015 году ООО «Биоэнергетическая компания» построила электростанцию мощностью 4,3 МВт, работающую на древесных отходах ОАО «Сыктывкарского ЛДК».

ООО «СевЛесПил» — крупнейшее лесопильное предприятие Республики Коми, обеспечивает собственные производственные нужды в энергоресурсах и поставляет тепловую и электрическую энергию другим потребителям от собственной мини-ТЭЦ. Производительность мини-ТЭЦ с котлами для сжигания

древесных отходов и турбинной установкой для выработки электроэнергии составляет 10 т пара в час. На ТЭЦ сжигается 7 т кородревесных отходов в час.

В рамках Соглашения о сотрудничестве в области малой гидроэнергетики между Правительством Республики Коми и ЗАО «Норд Гидро» в 2014 году был разработан проект восстановления малой ГЭС мощностью 550 кВт в поселке Кажим Койгородского района. Приплотинная ГЭС с напорным подводным водоводом, двумя агрегатами суммарной мощностью 500 кВт и отдельным водоотводящим каналом ранее использовалась, как источник электроснабжения для поселка Кажим и лесопункта (сейчас не действует). Конструкция ГЭС была деревянно-ряжевой [10]. Ввод новой станции в эксплуатацию планировался в 2016 году, но пока строительство не завершено, реконструирован только водосброс, теперь он бетонный (рис. 5). Строительство других объектов малой гидроэнергетики не запланировано [11].



Рис. 5. Кажимская малой ГЭС

Fig. 5. Kagimskaya small hydroelectric station

Северная часть Республики Коми располагает таким возобновляемым источником энергии как ветер. Здесь в районе Воркуты с 1993 года успешно эксплуатировалась Заполярная ВЭС мощностью 1,5 МВт. Она состоит из шести установок АВЭ-250 российско-украинского производства мощностью 250 кВт каждая (рис. 6). Станция использовалась в качестве источника аварийного электроснабжения Усинского водозабора. В настоящее время не работает.

В 2013 году ОАО «Воркутауголь» установило на железнодорожной станции «Центральная» ВЭУ мощностью 6 кВт, которая позволяет снизить расходы на электроэнергию. Ввода новых объектов ветроэнергетики не намечается.



Рис. 6 Ветроэлектростанция под Воркутой

Fig. 6 Wind power station near Vorkuta

Примером использования шахтного газа может служить строительство АО «Воркутауголь» в 2014 г. двух газопоршневых электростанций (ГПТЭС-1 и ГПТЭС-2) мощностью 12 и 6 МВт в контейнерном исполнении, утилизирующих шахтный газ метан. Одна из них расположена на вентиляционном стволе шахты «Северная», а вторая на промплощадке. Обе производят тепло и электроэнергию для нужд производства, утилизируя при этом до 28 тыс. м³ попутного газа.

Также Общество с ограниченной ответственностью «Нобель Ойл» Компания-Оператор (ООО «Нобель Ойл» (КО)), занимающееся нефтедобычей в республике, планирует к 2018 году строительство электростанции собственных нужд установленной мощностью 14,6 МВт, работающей на попутном нефтяном газе.

ООО «РН-Северная нефть» начала эксплуатацию газогенераторных установок, работающих на попутном газе еще в 2002 году. И в настоящее время степень утилизации попутных газов на этом предприятии составляет 96 %.

ООО «Енисей» основным видом деятельности, которого является добыча сырой нефти и природного газа, использует попутный газ на нужды жилищно-коммунального хозяйства г. Усинска.

В рамках развития Арктической зоны РФ предполагается создание Воркутинской опорной зоны. Здесь ожидается строительство железной дороги длиной около 200 км, которая соединит северные районы Республики Коми с побережьем Карского моря, что позволит расширить рынки сбыта угля и создаст дополнительные возможности для развития моногорода Воркута за счет разработки новых месторождений угля и других полезных ископаемых, а также реконструкции тепло- и электроэнергетической инфраструктуры.

Пока роль возобновляемой энергетики в энергохозяйстве Республики Коми невелика, но попытки развития ВИЭ предпринимаются, в основном, в виде пилотных проектов отдельными промышленными предприятиями. Основной упор делается на создание электростанций, работающих на древесных отходах, а потенциальные ресурсы ветро- и гидроэнергии остаются невостребованными.

Выводы:

1. Энергосистема Республики Коми объединяет 6 крупных тепловых электростанций, вырабатывающих 97 % электроэнергии и ряд электростанций малой мощности. Формально система энергоизбыточна, но южный энергорайон испытывает дефицит тепло- и электроэнергии, а в северной части энергосистемы заперта значительная часть мощности Печорской ГРЭС. Слабые внутрисистемные и внешние связи приводят к тому, что энергосистема производит столько электроэнергии, сколько может потребить.

2. В целом электрические станции Коми энергосистемы характеризуется высокой изношенностью оборудования. Большинство из них эксплуатируется долгие годы (40–70 лет). С этим связаны серьезные аварии в Воркутинском энергорайоне.

3. Тепловое хозяйство также требует модернизация существующего оборудования или строительства новых котельных на газе. Износ котельного оборудования в отопительных котельных колеблется от 50 до 90 %.

4. Дальнейшее развитие энергетической системы Республики Коми связано со строительством линий электропередачи ВЛ 220 кВ Печорская ГРЭС – Ухта – Микунь и Печорская ГРЭС – Усинск, с завершением строительства шестого энергоблока Печорской ГРЭС, реконструкцией Воркутинской ТЭЦ-2 и увеличением генерирующей мощности ОАО "Монди Сыктывкарский ЛПК" на 80 МВт, а также со строительством возобновляемых источников энергии на биотопливе.

Литература:

1. Оценка численности населения по городским округам, муниципальным районам, поселениям и городским населенным пунктам Республики Коми. URL: http://komi.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/komi/ru/statistics/population/ (дата обращения 14.06.2018 г.)
2. Схема и программа развития электроэнергетики республики Коми на 2016–2021 годы. URL: <http://minprom.rkomi.ru> (дата обращения 13.06.2018 г.)
3. Схема электроснабжения потребителей Республики Коми. URL: <http://energy.csti.yar.ru/docimages/1120121016165352.jpg> (дата обращения 04.06.2018 г.)
4. Чайка Л. В. Энергетическая инфраструктура сельских поселений Республики Коми // Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера-2014: Материалы IV Всерос. Семинара (Сыктывкар, 24–26 сент. 2014 г.). Сыктывкар: Из-во ООО "Коми республиканская типография", 2014. Ч. 2. С. 136–143.
5. Выработка электроэнергии и отпуск тепла за 2017 год (факт). URL: <http://www.tplusgroup.ru/org/komi/key-figure/> (дата обращения 25.06.2018 г.)
6. Успенская И. Г. Современные проблемы прогнозирования энергопотребления региона (на примере Республики Коми) / Успенская И. Г. // Современные проблемы прогнозирования энергопотребления региона. 2009. № 5. С. 120–133.

7. Коновалова О. Е. Перспективы комплексного использования возобновляемых источников энергии Мурманской области // Труды КНЦ РАН, Энергетика. Вып. 8. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, № 3/2014(22). С. 94–97.
8. Минин В. А. Перспективы использования микроГЭС в удаленных районах Севера / Минин В. А., Коновалова О. Е., Иванова Е. А. // Вестник Кольского научного центра – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. № 3/2013(14). С. 64–75.
9. Леканова Т. Л. Практические рекомендации по использованию отходов деревообработки для производства электроэнергии / Леканова Т. Л., Андронов А. В. // Фундаментальные исследования. 2017. № 10. С. 239–244.
10. Коновалова О. Е. Восстановление малых гидроэлектростанций — новый этап развития гидроэнергетики / Коновалова О. Е., Морошкина Т. Н. // Труды КНЦ РАН, Энергетика. Выпуск 10. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, № 2/2015(28). С. 124–131.
11. Коновалова О. Е. Малая возобновляемая энергетика на северо-западе Арктики / Коновалова О. Е., Никифорова Г. В. // Труды КНЦ РАН, Энергетика. Вып. 12. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, № 1/2016(35). С. 116–130.

Сведения об авторах:

Коновалова Ольга Евгеньевна,

младший научный сотрудник лаборатории энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21-А
Эл.почта: konovalova@ien.kolasc.net.ru

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.79-85
УДК 621.311

Т. В. Аксенович

МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ТОКОВ В НЕЙТРАЛИ АВТОТРАНСФОРМАТОРА

Аннотация

В данной статье приведено сравнение вейвлет-преобразования с преобразованием Фурье, а также основная информация о нем и области его применения. Представлен пример использования вейвлет-преобразования для комплексного анализа данных системы регистрации воздействий магнитосферных возмущений на энергетические системы Кольского полуострова и Карелии.

Ключевые слова:

вейвлет, непрерывное вейвлет-преобразование, преобразование Фурье, вейвлет-спектр, электрические сети.

T. V. Aksenovich

METHODS OF DIGITAL PROCESSING OF CURRENTS IN THE NEUTRAL OF THE AUTOTRANSFORMER

Abstract

This article contains comparison of wavelet transform with Fourier transform and basic information about wavelet transform and areas of its application. An example of using wavelet transform for the complex analysis of data from the system of recording the effects of magnetospheric disturbances on the energy systems of Kola Peninsula and Karelia is given.

Keywords:

wavelet, continuous wavelet transform, Fourier transform, wavelet spectrum, transmission grid.

В настоящее время при анализе сигналов с изменяющейся частотой стало очень востребованным их частотно-временное представление. Оно в большей мере позволяет выявить и изучить закономерности изменения тех или иных параметров сигнала.

Методом, позволяющим более или менее точно определить характеристики функции и давно получившим широкое применение, является оконное преобразование Фурье (ОПФ). Но, главный его недостаток связан с проблемой разрешения. Согласно принципу неопределенности Гейзенберга для частотно-временного преобразования: невозможно получить произвольно точное частотно-временное представление сигнала, то есть нельзя определить для какого-то момента времени, какие спектральные компоненты присутствуют в сигнале. Этот метод позволяет определить лишь временные интервалы, в течение которых имеются определенные полосы частот. Таким образом, главная сложность применения ОПФ заключается в выборе ширины используемой оконной функции. При компактном носителе мы получаем лучшее временное разрешение, а при широком — лучшее частотное.

Часто для анализа сигнала требуется применить разные по своим характеристикам окна, когда возможно использовать лишь одно, поэтому, если позволяют характеристики, приходится отказываться от хорошего спектрального разрешения в пользу временного и наоборот [1].

В последнее десятилетие вместо ОПФ стали все чаще использовать относительно новый метод — вейвлет-преобразование (ВП). Вейвлет (в переводе с английского означает «маленькая волна» или еще проще «всплеск») представляет собой одиночную волну, локализованную в узкой области физического пространства, и быстро стремящуюся к нулю при удалении от точки локализации.

Существует понятие материнского вейвлета $\psi(t)$, который является прототипом всех функций, получаемых в результате его масштабирования и переноса. Например: вейвлет Хаара, ФНАТ-вейвлет («Французская шляпа»), МНАТ-вейвлет («Мексиканская шляпа»), Wave-вейвлет, вейвлет Морле и другие (рис. 1). В зависимости от того, какую информацию необходимо извлечь из сигнала, выбирается анализирующий вейвлет. Каждый вейвлет имеет характерные особенности во временном и в частотном пространстве, поэтому иногда с помощью разных вейвлетов можно полнее выявить и подчеркнуть те или иные свойства анализируемого сигнала [2].

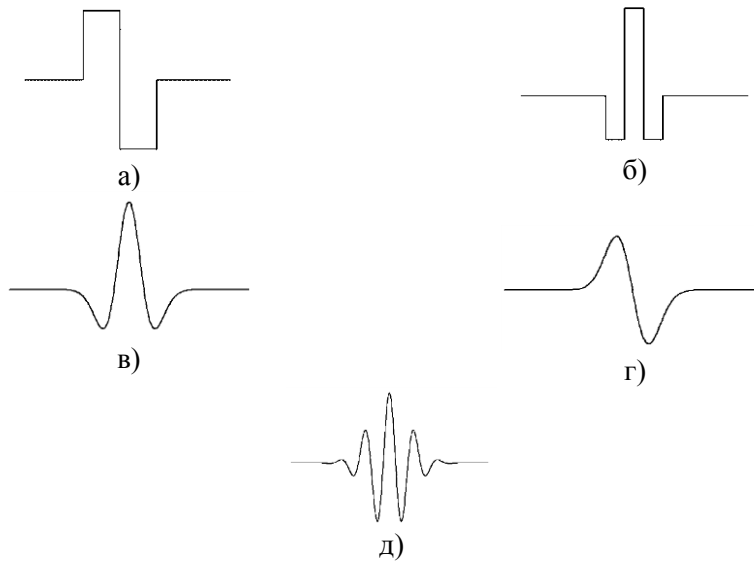


Рис. 1. Примеры часто используемых вейвлетов: (а) вейвлет Хаара, (б) ФНАТ-вейвлет, (в) МНАТ-вейвлет, (г) Wave-вейвлет, (д) вейвлет Морле

Pic. 1. Examples of commonly used wavelets: (а) HAAR wavelet, (б) FНAT wavelet, (в) МНАТ wavelet, (г) Wave wavelet, (д) Morlet wavelet

Чтобы быть вейвлетом, функция обязательно должна обладать данными признаками:

1. Локализация во временном пространстве и по частоте.
2. Нулевое среднее:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$$

3. Ограниченность:

$$\int |\psi(t)|^2 dt < \infty$$

4. Автоподобность базиса – самоподобие.

Существует два вида вейвлет-анализа: непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) и дискретное вейвлет-преобразование (ДВП). Главное отличие второго от первого — экономичность, выражающаяся в меньшем числе операций и, как следствие, меньшем занимаемом объеме памяти.

НВП представляет собой скалярное произведение анализирующего вейвлета на заданном масштабе и анализируемого сигнала и имеет следующий вид:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{ab}^*(t) dt,$$

где a, b — масштабный коэффициент и параметр сдвига;

$\psi_{ab}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ — семейство функций, полученных из материнского вейвлета.

Результатом ВП одномерного ряда служит двумерный массив значений коэффициентов $W(a, b)$. Распределение этих значений в пространстве дает информацию об изменении относительного вклада компонент разного масштаба во времени и называется спектром коэффициентов вейвлет-преобразования или вейвлет-спектром. Чаще всего используется двумерная визуализация вейвлет-спектра в виде проекции на плоскость (a, b) с изолиниями или изоуровнями, по которым возможно отследить изменение интенсивности коэффициентов, а также картины линий локальных экстремумов поверхностей (так называемый «скелетон»), которые позволяют четко выявить структуру анализируемого процесса.

ВП дает возможность уменьшить влияние принципа неопределенности Гейзенберга на полученном частотно-временном представлении сигнала. С его помощью низкие частоты имеют более детальное представление относительно времени, а высокие — относительно частоты.

Непрерывное вейвлет-преобразование больше подходит для анализа сигналов, чем дискретное вейвлет-преобразование потому, что ему присуща избыточность, связанная с непрерывным изменением масштабного коэффициента a и параметра сдвига b . Это положительное качество позволяет более полно и четко представить и проанализировать содержащуюся в данных информацию.

Существенным отличием ВП от ОПФ является то, что в случае вейвлет-анализа процесса в связи с изменением масштаба (растяжением/сжатием) вейвлеты способны выявить различие в характеристиках процесса на различных шкалах (частотах), а посредством сдвига можно проанализировать свойства процесса в различных точках на всем исследуемом интервале [3]. Тем самым можно говорить о хорошей локализации этих функций, как во временной, так и в частотной области, что является важным при исследовании нестационарных сигналов.

В настоящее время вейвлетный анализ начинает широко применяться в разных областях деятельности для решения различных задач: при обработке временных рядов в геофизике [4], метеорологии, медицине и биологии, при исследовании вибраций и нагруженности машин и механизмов, при сжатии больших объемов информации, анализе изображений и др.

На протяжении многих лет, начиная с 2003 года, ЦЭС КНЦ РАН и ПГИ совместно проводят работы по исследованию влияния геомагнитных бурь (ГМБ) на состояние энергетических сетей и трансформаторных подстанций в Мурманской области и Карелии. Для этого используется разработанная региональная система мониторинга геоиндуктированных токов (ГИТ) [5], протекающих в нейтральных трансформаторов и автотрансформаторов в периоды ГМБ. В ходе анализа значительного массива данных, накопленного в результате 15 лет проведения регистраций, было выявлено, что устройства регистрации ГИТ позволяют фиксировать информацию не только о ГМБ, но и о грозовых перенапряжениях, переходных процессах, коммутациях, влиянии сторонних источников и других явлениях в энергосистеме.

Система мониторинга ГИТ позволяет проводить регистрацию квазипостоянных токов в нейтральных автотрансформаторов, а также контролировать содержание гармоник в сети. Каждые 0.1 с регистрируются и записываются в файл следующие составляющие полного тока в нейтрали, полученные разложением в ряд Фурье с интегрированием на временном интервале 0.1 с:

- постоянная составляющая I_0 , несущая информацию непосредственно о ГИТ, грозах и коммутациях. Сигнал вычисляется по формуле $I_0 = \frac{1}{5T} \int_0^{5T} IN(t) dt$, где $IN(t)$ — мгновенное значение тока нейтрали; $T = 0,02c$ — период промышленной частоты; $5T = 0,1c$ — интервал интегрирования;

- амплитудные значения токов первой I_1 , второй I_2 и третьей I_3 гармоник, которые позволяют оценить изменение гармонического состава полного тока в нейтрали при протекании ГИТ значительной амплитуды, а также фиксируют периодические составляющие токов нулевой последовательности, возникающие при коротких замыканиях и других несимметричных режимах. Токи гармоник вычисляются по формулам $I_k = \sqrt{B_k^2 + C_k^2}$, где $k = 1, 2, 3$ — номер гармоники, $B_k = \frac{2}{5T} \int_0^{5T} IN(t) \sin(2\pi k \frac{t}{T}) dt$ и $C_k = \frac{2}{5T} \int_0^{5T} IN(t) \cos(2\pi k \frac{t}{T}) dt$ — коэффициенты ряда Фурье для k -й гармоники.

Так как постоянная составляющая и гармоники относятся к нестационарным сигналам, то к ним можно применить вейвлет-преобразование для анализа.

На рис. 2 изображены: анализируемый сигнал (сверху) — ток в нейтрали автотрансформатора с грозовым импульсом (острый пик) и картина коэффициентов его вейвлет-преобразования (снизу). В вейвлет-спектре можно отчетливо увидеть грозовой импульс, проявляющийся в виде бордовой узкой клиновидной области, что соответствует положительным значениям $W(a, b)$. Клин локализован в районе малого масштаба (0–32), что говорит о том, что грозовой импульс является высокочастотным сигналом.

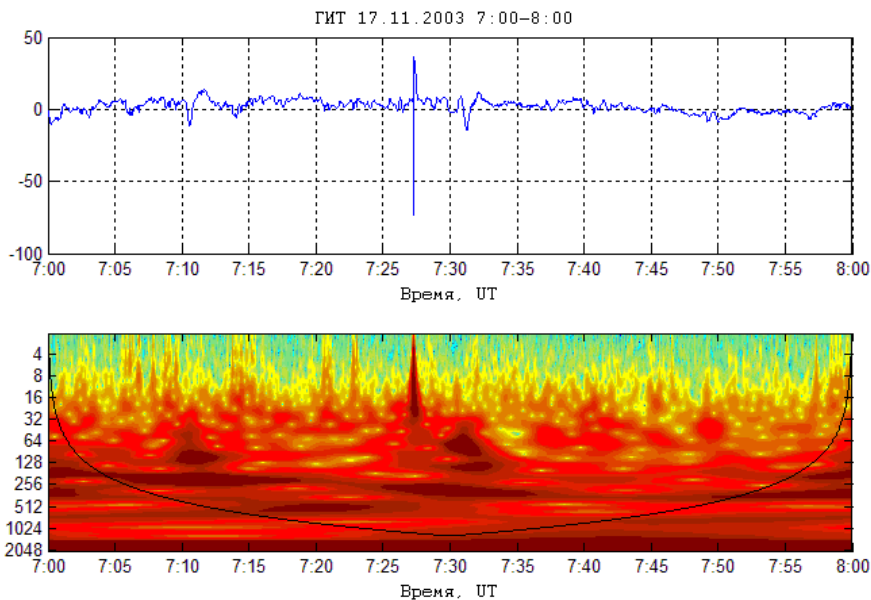


Рис. 2. Ток в нейтрали автотрансформатора при грозе и его вейвлет-спектр

Pic. 2. Current in the neutral of the autotransformer during a thunderstorm and its wavelet spectrum

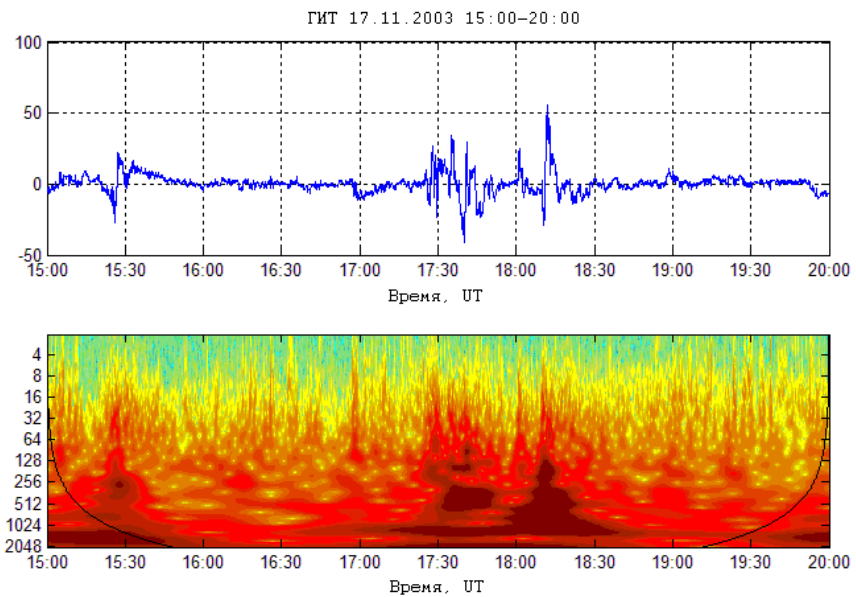


Рис. 3. Ток в нейтрали автотрансформатора при ГМБ и его вейвлет-спектр

Pic. 3. Current in the neutral of the autotransformer during the geomagnetic storm and its wavelet spectrum

На рис. 3 показан анализируемый сигнал (сверху) — ток в нейтрали автотрансформатора при ГМБ и картина коэффициентов его вейвлет-преобразования (снизу). Возбуждение геомагнитной бурей ГИТ в линии отчетливо видно в виде бордовой и близкой к ней области в районе больших масштабов (120–2000), по сравнению с предыдущим явлением, что соответствует низкочастотному сигналу, каким и является ГИТ. Его частота варьируется от 0.001 до 1 Гц. Коэффициенты $W(a, b)$ также положительны.

Как можно убедиться из приведенных выше рисунков, вейвлетный анализ, по сравнению с оконным преобразованием Фурье, рассмотренным в начале статьи, позволяет определить точные частотные и временные параметры исследуемого сигнала — тока в нейтрали автотрансформатора. Также на картине коэффициентов вейвлет-преобразования отчетливо видны процессы, вызванные внешними воздействиями на Кольскую энергосистему: грозовой импульс и ГИТ. Все это дает основания для дальнейшего изучения и применения ВП для анализа данных с устройств мониторинга гроз и геомагнитных возмущений.

Выводы

Применение непрерывного вейвлет-преобразования для анализа нестационарных сигналов, какими являются данные системы мониторинга гроз и геомагнитных возмущений, является перспективной темой. В сравнении с оконным преобразованием Фурье, вейвлетный анализ показывает лучшую частотно-временную локализацию и, как следствие, позволяет выявить внутреннюю структуру существенно неоднородного процесса и изучить его локальные свойства. Этот метод позволяет анализировать такие явления, имеющие отражение в токе в нейтрали автотрансформатора, как ГИТ, грозы, коммутации и другие.

Литература

1. Robi Polikar // The wavelet tutorial (Введение в вейвлет-преобразование, автор перевода — В. Г. Грибунин) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.autex.spb.su/download/wavelet/books/tutorial.pdf> (дата обращения: 15.10.2018).
2. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145–1171.
3. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2003. 104 с.
4. Верзунов С. Н., Лыченко Н. М. Разработка автоматизированной системы для анализа геомагнитных вариаций на основе вейвлет-технологий // Математические структуры и моделирование. 2014. №4(32). С. 185–197.
5. Баранник М. Б., Данилин А. Н., Катькалов Ю. В., Колобов Б. Б., Сахаров Я. А., Селиванов В.Н. Система регистрации геоиндуцированных токов в нейтральных силовых автотрансформаторов // ПТЭ. 2012. № 1. С. 118–123.

Сведения об авторе

Аксенович Татьяна Валерьевна,

лаборант лаборатории высоковольтной энергетики и технологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», студент кафедры физики, биологии и инженерных технологий филиала Мурманского арктического государственного университета в г. Апатиты, Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А эл. почта: aksenovich.tanya@gmail.com

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.85-97

УДК 621.317

В. В. Колобов, М. Б. Баранник

ЗАЩИТА ВЫХОДА ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Аннотация

Генератор импульсов тока с индуктивным накопителем энергии был разработан для использования в составе портативного измерительного комплекса для определения стационарного сопротивления заземляющих устройств опор линий электропередачи. Особенностью измерительного комплекса является то, что нагрузка генератора в виде контура с током может иметь различное сопротивление. В районах с плохопроводящими грунтами сопротивление контура может составлять 1–4 кОм. В случае обрыва проводника токовой линии, сопротивление нагрузки генератора будет бесконечно большим. Поэтому, необходимо обеспечить защиту MOSFET-ключей выходного каскада генератора от перенапряжений, возникающих при коммутации индуктивного накопителя. Для такой защиты может быть использован режим лавинного пробоя самих MOSFET-транзисторов. В работе приведены примеры расчета лавинной устойчивости выбранного типа транзисторов при однократном лавинном пробое, включая

самый напряженный режим «коммутации разомкнутой индуктивности», при котором вся энергия, накопленная в индуктивном накопителе, должна быть рассеяна в транзисторах за время лавинного процесса. В статье приведены также результаты численного моделирования

Ключевые слова:

генератор импульсов тока, индуктивный накопитель, защита от перенапряжений, токовый контур, режим лавинного пробоя, устойчивость к лавинному процессу, энергия однократного лавинного импульса, рассеяние мощности.

V. V. Kolobov, M. B. Barannik

AN OVERVOLTAGE PROTECTION FOR THE PULSE GENERATOR BASED ON INDUCTIVE ENERGY STORAGE

Abstract

The current pulse generator with inductive energy storage was designed for use in the portable system for obtains the low-frequency resistance of transmission tower grounding devices. The special feature of the measuring system is that the resistance of the current loop, as the generator load, is not constant. In high soil resistivity areas the load resistance of the generator may be 1-4 kOm and in a case of breaking the current lead the load resistance will be infinite. Therefore, it is necessary to protect the MOSFETs of output stage of the generator from overvoltages due to inductive storage switching. For this purpose the avalanche mode of the MOSFETs may be used. Examples of calculating the single pulse avalanche robustness of the selected power MOSFETs, including the case of unclamped inductive switching, in which the all of energy stored in the inductance must be dissipated in the transistors during avalanche mode, are given in the paper. A simulation results are also presented in the article.

Keywords:

current pulse generator, inductive energy storage, overvoltage protection, current loop, avalanche mode, avalanche robustness, single pulse avalanche energy, power dissipation.

Для измерения стационарного сопротивления заземляющих устройств (ЗУ) опор воздушных линий электропередачи (ВЛ), в том числе находящихся под грозозащитным тросом, и отдельностоящих ЗУ могут использоваться измерительные комплексы, основанные на определении временной зависимости мгновенного (переходного) сопротивления $Z(t)$ заземляющего устройства при импульсном воздействии. Генератор таких комплексов должен формировать импульсы тока прямоугольной формы с минимальной длительностью фронта и постоянной амплитудой на интервале измерений. [1]. В измерителе сопротивлений ЗУ импульсным методом, разработанном в ЦЭС КНЦ РАН, используется генератор импульсов тока (ГИТ) на основе индуктивного накопителя энергии (ИНЭ) [2]. В данном применении ГИТ с ИНЭ обладают рядом преимуществ по сравнению с генераторами емкостного типа [2, 3]. Здесь лишь отметим, что ГИТ с ИНЭ позволяют формировать в контуре с током импульс, форма которого на измерительном интервале практически не зависит от неравномерного распределения волнового сопротивления вдоль линии с током и от наличия отражений от ее конца, а также обладают лучшими энергетическими характеристиками, что позволяет успешно проводить измерения сопротивления ЗУ, расположенных в районах с высоким удельным сопротивлением грунтов [4].

Основными элементами ГИТ такого типа являются индуктивный накопитель энергии и коммутатор тока. В фазе заряда ИНЭ (накачки) коммутатор тока открыт, и

энергия накапливается в индуктивности. Затем коммутатор разрывает ток через ИНЭ и начинается фаза разряда — передачи энергии в нагрузку [5]. За счет изменения длительности фазы накачки $\Delta t_{\text{НК}}$ можно регулировать энергию, запасаемую в ИНЭ, и, соответственно, амплитуду импульса тока в нагрузке.

В первоначально разработанной схеме ГИТ в качестве ИНЭ использовался повышающий трансформатор, а в качестве коммутатора тока — IGBT транзистор [3]. Проведенные экспериментальные исследования показали, что такая схема ГИТ с ИНЭ имеет недостаток — при коммутации тока возникает резонансный процесс обмена энергией между индуктивностью рассеяния трансформатора и комбинацией паразитных емкостей IGBT ключа и межобмоточной емкости трансформатора, что приводит к возникновению высокочастотных осцилляций на плато импульса тока. Демпфирующие (снабберные) цепи, широко применяемые в схемах обратных преобразователей напряжения, в данной схеме не могут быть использованы, так как приводят к затягиванию фронта импульса тока, а проведенная оптимизация конструкции трансформатора с целью минимизации межобмоточной емкости и индуктивности рассеяния [3] не позволила значительно уменьшить амплитуду паразитных осцилляций тока.

Для устранения искажений формы выходного импульса тока генератора была разработана бестрансформаторная схема ГИТ, в которой в качестве ИНЭ используется катушка индуктивности (накопительный дроссель), а в качестве коммутаторов тока — MOSFET-транзисторы. Упрощенная функциональная схема выходного каскада генератора приведена на рис. 1.

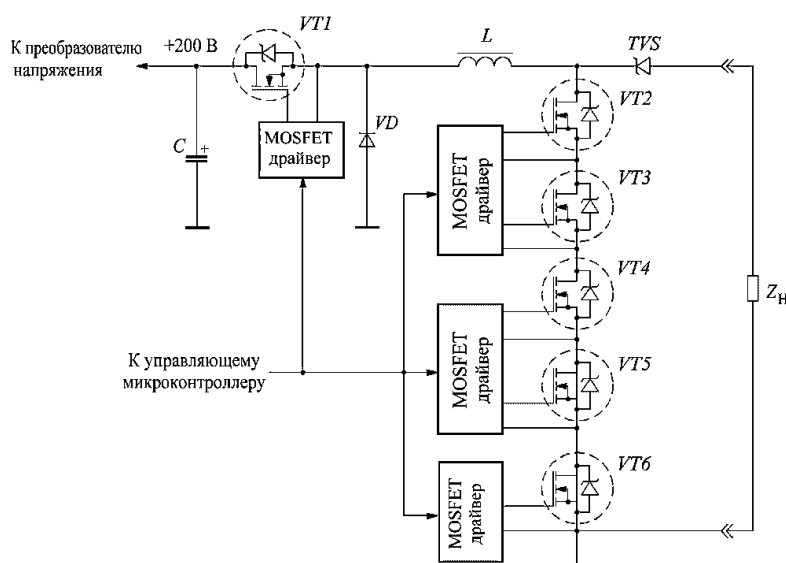


Рис. 1. Функциональная схема выходного каскада генератора импульсов тока с дросселем в качестве индуктивного накопителя энергии и MOSFET-транзисторами в качестве ключей

Fig. 1. Circuit diagram of output stage of the current pulse generator based on an inductor as energy storage and MOSFETs as switches

Замыкающий коммутатор тока (в соответствии с терминологией, принятой при построении ГИТ с ИНЭ) выполнен на одном транзисторе $VT1$, а прерыватель тока состоит из пяти последовательно включенных транзисторов $VT2-VT6$. Питание первичного емкостного накопителя C осуществляется от импульсного преобразователя с выходным напряжением 200 В.

В качестве ключей $VT1-VT6$ использованы N-канальные SuperMesh Power MOSFET-транзисторы STF9NK90Z фирмы STMicroelectronics с максимальным током стока I_D 8 ампер, напряжением лавинного пробоя сток-исток BV_{DSS} 900 вольт и типовым сопротивлением в проводящем состоянии R_{on} 1.1 Ом [6]. Транзисторы семейства SuperMesh отличаются малым сопротивлением сток-исток в открытом состоянии, обладают высокой скоростью нарастания напряжения dv/dt и имеют встроенные встречные защитные стабилитроны между выводами затвора и истока (на рис. 1 не показаны).

Применение бестрансформаторной схемы ГИТ с ИНЭ и использование быстродействующих MOSFET-ключей позволило не только устранить искажения формы импульса тока, но и уменьшить длительность фронта (рис. 2).

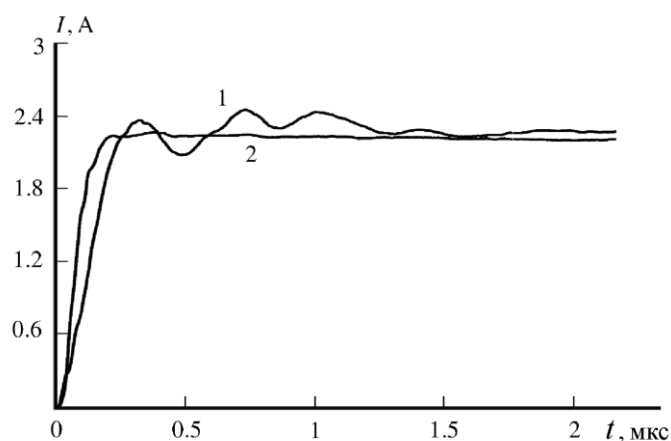


Рис. 2. Типовые экспериментальные осциллограммы импульсов тока генератора с индуктивным накопителем энергии: на основе трансформатора (1), на основе дросселя (2)

Fig. 2. Typical experimental waveforms of the output pulses for the generator with inductive energy storage: based on the pulse transformer (1), based on the inductor (2)

Разработанный ГИТ с ИНЭ имеет следующие основные технические характеристики: форма импульса фронт/полуспад — 0.15/50 мкс при сопротивлении нагрузки 1 кОм; амплитуда импульса тока — до 5 А; напряжение на нагрузке — до 4.5 кВ; энергия импульса — до 1 Дж; режим работы — повторяющиеся импульсы с интервалом 1–2 с.

Особенностью работы ГИТ с ИНЭ в составе измерительного комплекса для измерения сопротивления ЗУ является наличие волновых процессов в нагрузке генератора — линии с током. Сопротивление нагрузки генератора Z_H складывается из сопротивления ЗУ и сопротивления токовой линии,

определяемого импульсными процессами за время пробега волны тока до конца линии и обратно (0.5–1 мкс). По истечении времени двойного пробега сопротивление токовой линии, в зависимости от степени ее согласования с заземляющим электродом (ЗЭ), может определяться относительно небольшим волновым сопротивлением линии (400–500 Ом) или стремиться к сопротивлению ЗЭ, которое может быть значительным (1–3 кОм в районах с высоким удельным сопротивлением грунта). В случае обрыва проводника токового контура во время проведения измерений, сопротивление нагрузки ГИТ будет бесконечно большим – $Z_H = \infty$. Так как в фазе разряда ИНЭ амплитуда напряжения на транзисторах VT2-VT6 пропорциональна Z_H , то при большом значении Z_H напряжение на транзисторах может превысить предельно допустимую величину. Обычно в схему генератора добавляется защитный электронный компонент, который должен ограничивать возникающее перенапряжение на транзисторах VT2-VT6 и частично или полностью (в случае $Z_H = \infty$) рассеивать энергию, накопленную в ИНЭ. Так, в схеме ГИТ с накопительным трансформатором [3], для этого используется варистор.

В рассматриваемой схеме ГИТ с накопительным дросселем функцию защитного элемента выполняют сами MOSFET-транзисторы VT2-VT6, переходящие в режим лавинного пробоя (avalanche mode) [7]. Если для MOSFET-транзисторов первых поколений возникновение лавинного пробоя считалась запрещенным режимом, то современные силовые MOSFET-транзисторы имеют повышенную устойчивость к лавинному режиму (avalanche robustness). Практически все производители современных силовых MOSFET-транзисторов испытывают их на лавинный пробой и не только гарантируют, при соблюдении определенных условий, их устойчивость к однократному или повторяющемуся лавинному пробоя, но и предоставляют всю необходимую информацию для теплового расчета ключей в таком режиме работы [8, 9]. Так, производитель используемых в схеме генератора SuperMesh MOSFET-транзисторов гарантирует, что все транзисторы проходят испытание на лавинную устойчивость [6].

Рассмотрим возможность использования транзисторов выбранного типа — STF9NK90Z — для защиты от перенапряжений на выходе генератора. Оценивать устойчивость ключей будем для случая самого напряженного лавинного режима — так называемого, незамкнутого индуктивного переключения (unclamped inductive switching), при котором генератор работает в режиме холостого хода, и вся энергия, накопленная в индуктивности за время фазы накачки, должна быть рассеяна в транзисторах за время лавинного процесса. Такой режим используют производители при испытаниях MOSFET-транзисторов на лавинную устойчивость [9, 10]. Причем будем рассматривать случай максимальной для генератора длительности фазы накачки, что соответствует максимально возможной энергии индуктивного накопителя.

Для предотвращения термического разрушения MOSFET-ключа в режиме однократного лавинного пробоя необходимо, чтобы выполнялось три условия [7, 9]:

1) импульс тока через транзистор не должен превышать максимальный ток пробоя: $I_{Dmax} \leq I_{AR}$;

2) рассеиваемая в проводящем канале ключа энергия не должна превышать максимально допустимую энергию пробоя для одиночного импульса: $E_{AV} \leq E_{AS}$;

3) температура канала транзистора за время лавинного процесса $T_{j \max}$ не должна превысить предельно допустимую температуру канала $T_{j \lim}$. Так как для одиночного импульса постоянная времени теплоотвода много больше постоянной времени кристалла, то сравниваются именно температуры канала $T_{j \max}$ и $T_{j \lim}$.

Значения I_{AR} , $T_{j \lim}$ и кривая зависимости допустимой энергии пробоя от температуры канала $E_{AS}(T_j)$ приводятся в документации на транзистор [6].

В рассматриваемом ГИТ на основе ИНЭ длительность формируемых импульсов тока значительно меньше периода их повторения, поэтому пробой можно считать однократным. Рассмотрим выполнения каждого из условий.

1. Максимальная амплитуда импульса тока генератора составляет 5 А, тогда как согласно [6] максимальный ток пробоя I_{AR} для транзистора STF9NK90Z ограничен величиной 8 А, следовательно, первое условие выполняется.

2. Так как значение допустимой энергии E_{AS} , выделяемой при пробое, зависит от температуры канала, то сначала найдем температуру канала транзистора перед началом пробоя $T_{j \text{ start}}$.

В фазе заряда (накачки) емкостного накопителя энергии ключи находятся в проводящем состоянии, тогда для температуры канала перед началом лавинного процесса можно записать: $T_{j \text{ start}} = T_{\text{case}} + \Delta T_{j \text{ on}}$ где: T_{case} — начальная температура корпуса транзистора, которую можно принять равной температуре окружающей среды (25 °С), а $\Delta T_{j \text{ on}}$ — изменение температуры канала за время нахождения транзисторов в проводящем состоянии. Это изменение температуры может быть найдено, как: $\Delta T_{j \text{ on}} = Z_{\text{thjc}}(\Delta t_{\text{on}})P_{\text{on}}$ [7]. В этом выражении: $Z_{\text{thjc}}(\Delta t_{\text{on}})$ — тепловой импеданс канал-корпус транзистора, зависящий от длительности импульса тока через транзисторы, P_{on} — среднеквадратичное (действующее) значение рассеиваемой мощности в проводящем канале транзисторов за время накачки, а $\Delta t_{\text{on}} = \Delta t_{\text{HK}}$ — время нахождения ключей в проводящем состоянии (время накачки ИНЭ). Потери в каждом транзисторе VT2-VT6 за это время определяются суммой статических потерь на проводимость и динамических потерь на переключение: $P_{\text{on}} = P_{\text{cond}} + P_{\text{sw}}$. Тогда: $\Delta T_{j \text{ on}} = Z_{\text{thjc}}(\Delta t_{\text{on}}) (P_{\text{cond}} + P_{\text{sw}})$.

При заряде ИНЭ ток в канале транзисторов нарастает по закону:

$$I_D(t) = \frac{U_{\Pi}}{R_{\text{ИН}}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R_{\text{ИН}} t}{L}} \right), \quad (1)$$

где U_{Π} — напряжение питания выходного каскада ГИТ (на первичном емкостном накопителе); $R_{\text{ИН}}$ — активное сопротивление индуктивного накопителя в фазе накачки, определяемое активным сопротивлением дросселя R_L и суммарным сопротивлением ключей VT1-VT6 в открытом состоянии: $R_{\text{ИН}} = R_L + 6 \cdot R_{\text{on}}$. Для транзистора STF9NK90Z типовое значение R_{on} составляет 1.1 Ом [6], а активное сопротивление дросселя — 25 Ом. Тогда: $R_{\text{ИН}} = 6 \cdot 1.1 + 25 = 31.6$ Ом.

Из выражения (1) можно определить длительность фазы накачки Δt_{HK} , необходимую для достижения максимальной амплитуды тока индуктивного накопителя энергии I_{max} :

$$\Delta t_{\text{HK}} = -\frac{L}{R_{\text{ИН}}} \cdot \ln \left(1 - \frac{R_{\text{ИН}} I_{\text{max}}}{U_{\Pi}} \right). \quad (2)$$

Подставляя в это выражение значения индуктивности дросселя $L=50$ мГн, максимального тока $I_{\max}=5$ А, напряжения питания $U_{\Pi}=200$ В и сопротивления $R_{\text{ИН}}$, находим: $\Delta t_{\text{HK}}=2.4 \cdot 10^{-3}$ с.

Так как при такой длительности фазы накачки потери на переключение ключей много меньше потерь проводимости, то ими можно пренебречь. Тогда выражение для изменения температуры канала транзисторов за время накачки примет вид: $\Delta T_{\text{jon}} = Z_{\text{thjc}}(\Delta t_{\text{on}}) P_{\text{cond}}$.

Для действующего значения мощности P_{cond} , выделяемой в канале каждого транзистора, можно записать:

$$P_{\text{cond}} = R_{\text{on}} \cdot I_{D \text{ RMS}}^2 = R_{\text{on}} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{\Delta t_{\text{on}}} \int_0^{\Delta t_{\text{on}}} (I_D(t))^2 dt} \right)^2 = \frac{R_{\text{on}}}{\Delta t_{\text{on}}} \int_0^{\Delta t_{\text{on}}} (I_D(t))^2 dt, \quad (3)$$

где $I_{D \text{ RMS}}$ — среднеквадратичное значение тока через транзистор за интервал проводящего состояния ключа, а $\Delta t_{\text{on}} = \Delta t_{\text{HK}}$.

Подставляя выражение (1) в (3), находим:

$$P_{\text{cond}} = \frac{R_{\text{on}} \cdot U_{\Pi}^2}{\Delta t_{\text{on}} \cdot R_{\text{ИН}}^2} \int_0^{\Delta t_{\text{on}}} \left(1 - e^{-\frac{R_{\text{ИН}} t}{L}} \right)^2 dt. \quad (4)$$

Подставляя в это выражение известные значения R_{on} , Δt_{on} , $R_{\text{ИН}}$, U_{Π} , L , находим: $P_{\text{cond}} \approx 14$ Вт.

Значение теплового импеданса определяется из выражения $Z_{\text{thjc}}(\Delta t_{\text{on}}) = k \cdot R_{\text{thj-c}}$, где $R_{\text{thj-c}}$ — тепловое сопротивление канал-корпус транзистора, а коэффициент k определяется длительностью импульса тока Δt_{on} и находится по зависимости $k(\Delta t_{\text{on}})$ [8, 9]. Значение $R_{\text{thj-c}}$ и зависимость $k(\Delta t_{\text{on}})$ приводятся в технической документации на транзистор. Для MOSFET-ключа STF9NK90Z в корпусе TO-220FP: $R_{\text{thj-c}} = 3.1$ °C/Вт; $k(\Delta t_{\text{on}})$ для одиночного импульса тока длительностью $\Delta t_{\text{on}} = 2.4 \cdot 10^{-3}$ с составляет 0.06 [6]. Таким образом, начальная температура канала каждого транзистора после закрытия (перед лавинным пробоем) составляет: $T_{\text{jstart}} = T_{\text{case}} + \Delta T_{\text{jon}} = T_{\text{case}} + k R_{\text{thj}} P_{\text{cond}} = 25 + 0.06 \cdot 3.1 \cdot 14 = 27.6$ °C. Зная температуру кристалла, по кривой зависимости $E_{\text{AS}}(T_{\text{j}})$, приведенной в документации на транзистор [6], определим предельную допустимую энергию лавинного пробоя для одиночного импульса — $E_{\text{AS}} = 270$ мДж.

После окончания фазы накачки ИНЭ транзисторы VT1-VT6 закрываются, но, так как ток через индуктивность не может измениться скачком, через каналы транзисторов и диод VD будет протекать практически линейно уменьшающийся ток [11]:

$$I_D(t) = I_{\max} e^{-\frac{R_L t}{L}} + \frac{5BV_{\text{DSS}} - U_{\Pi}}{R_L} \left(e^{-\frac{R_L t}{L}} - 1 \right), \quad (5)$$

где BV_{DSS} — напряжение лавинного пробоя (breakdown voltage) транзисторов.

При этом, пока ток I_D не упадет до нуля, падение напряжения на закрытых транзисторах VT2-VT6 — U_{D2S6} (потенциал между истоком VT6 и стоком VT2) будет ограничено суммарным напряжением лавинного пробоя ключей [6] — $5 \cdot BV_{\text{DSS}} = 5 \cdot 900 = 4500$ В (рис. 3).

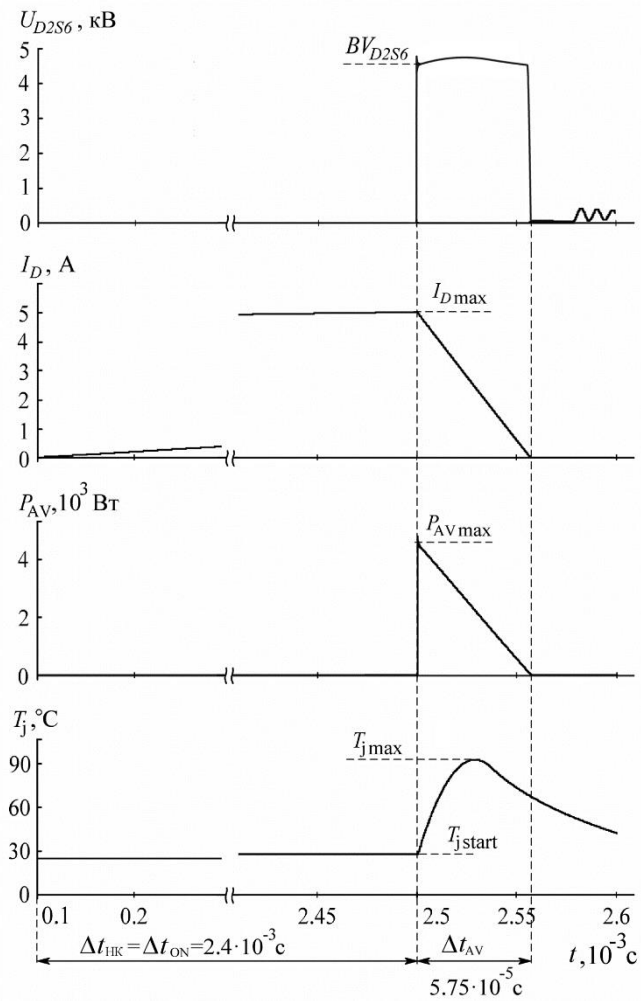


Рис. 3. Временные диаграммы, поясняющие лавинный режим MOSFET транзисторов генератора импульсов тока с индуктивным накопителем энергии

Fig. 3. Timing diagrams explaining the avalanche mode of MOSFETs of the current pulse generator with inductive energy storage

Транзисторы при этом будут находиться в режиме лавинного пробоя. Вся энергия, накопленная в индуктивности за время накачки Δt_{HK} , будет рассеяна в ключах за время лавинного процесса Δt_{AV} .

Длительность лавинного импульса тока может быть найдена из выражения (5):

$$\Delta t_{AV} = \frac{L}{R_L} \cdot \ln \left(1 + \frac{I_{max} R_L}{5BV_{DSS} - U_{II}} \right) \approx 5.75 \cdot 10^{-5} \text{ с.} \quad (6)$$

Зная длительность лавинного процесса, найдем суммарную энергию лавинного пробоя E_{AV} , выделяемую в пяти ключах:

$$E_{AV\Sigma} = \int_0^{\Delta t_{AV}} I_D(t) U_{D2S6}(t) dt \quad (7)$$

Зависимость $I_D(t)$, на интервале времени Δt_{AV} описываемая выражением (5), может быть заменена, практически без потери точности, более простой линейной функцией:

$$I_D(t) = \frac{I_{\max}}{\Delta t_{AV}} (\Delta t_{AV} - t). \quad (8)$$

Что касается напряжения U_{D2S6} , то в действительности оно на протяжении времени пробоя изменяется. Это обусловлено тем, что напряжение BV_{DSS} в процессе пробоя, из-за разогрева канала транзистора, сначала увеличивается, а затем уменьшается относительно начального значения BV_{DSS0} . Зависимость напряжения пробоя от температуры и тока стока транзистора может быть описана следующим выражением:

$$BV_{DSS}(T_j, I_D) = BV_{DSS0} + k_T \Delta T_j + k_I I_D, \quad (9)$$

где k_T и k_I — коэффициенты, зависящие от максимального рабочего напряжения сток-исток транзистора [12].

Для уточнения результатов расчета режимов работы транзисторов выходного каскада генератора при лавинном процессе было проведено моделирование с использованием программного комплекса «PLECS Standalone» [13]. Была разработана модель MOSFET-ключа STF9NK90Z, учитывающая его паразитные параметры и зависимость $BV_{DSS}(T_j, I_D)$. В результате моделирования были получены временные зависимости $U_{D2S6}(t)$ и $I_D(t)$ на временном интервале Δt_{AV} (рис. 3).

Результаты моделирования показали, что для рассматриваемой схемы максимальное значение BV_{DSS} за время лавинного процесса превышает BV_{DSS0} на 8 %. Чтобы увеличить достоверность расчета лавинного режима и учесть изменение U_{D2S6} на интервале пробоя, для BV_{DSS} можно ввести повышающий коэффициент 1.1: $U_{D2S6} = 5 \cdot 1.1 \cdot BV_{DSS}$. Тогда, по аналогии с (7), энергия лавинного пробоя, выделяемая в одном ключе, составит:

$$E_{AV} = \int_0^{\Delta t_{AV}} \frac{I_{\max}}{\Delta t_{AV}} (\Delta t_{AV} - t) \cdot 1.1 BV_{DSS} dt = 0.55 I_{\max} BV_{DSS} \Delta t_{AV} = 142 \text{ мДж} \quad (10)$$

Как было найдено выше: $E_{AS} = 270$ мДж. Соответственно, второе условие — $E_{AV} \leq E_{AS}$ — выполняется.

3. Найдем максимальную температуру канала транзисторов VT2-VT6 за время лавинного процесса: $T_{j \max} = T_{j \text{ start}} + \Delta T_{jAV}$, где $T_{j \text{ start}} = 27.6$ °C — определенная выше температура канала после нахождения транзисторов в проводящем состоянии во время фазы накачки ИНЭ, а ΔT_{jAV} — приращение температуры кристалла за время лавинного процесса Δt_{AV} .

В общем случае, при ряде допущений, мгновенное приращение температуры канала в момент времени t определяется сверткой двух функций времени — мгновенной рассеиваемой мощности $P(t)$ и некой импульсной характеристики тепловой системы $h(t)$, которая определяется производной по времени теплового импеданса канала транзистора $Z_{thj}(t)$ [12, 14]:

$$\Delta T(t) = \int_0^t P(t-\tau) h(\tau) d\tau = \int_0^t P(t-\tau) \frac{dZ_{thjc}(\tau)}{d\tau} d\tau. \quad (11)$$

Для определения приращения температуры канала ΔT_{jAV} за время лавинного процесса используются различные упрощенные методики. Так, в [7, 14] приращение температуры ΔT_{jAV} находится через пиковое значение рассеиваемой мощности $P_{AV(pk)}$, которая наблюдается (рис. 3) в момент закрытия ключей (переход от режима накачки в режим лавинного пробоя) и тепловой импеданс для импульса с длительностью $\Delta t_{AV}/2$:

$$\Delta T_{jAV} \approx \frac{2}{3} P_{AV(pk)} Z_{th}(\Delta t_{AV}/2). \quad (12)$$

При этом учитывается предположение, что температура канала достигает максимума в момент времени $\Delta t_{AV}/2$. [15].

Однако, как показывают современные исследования, такое предположение справедливо для MOSFET-транзисторов с напряжением пробоя, не превышающим 800 В. С увеличением напряжения пробоя момент максимума температуры канала смещается ближе к окончанию лавинного процесса [12]. Для ключей с $BV_{DSS}=900$ В, как в нашем случае, температура канала достигает максимума при $t \approx 0.6\Delta t_{AV}$ (см. рис. 3, на котором кривая $T_j(t)$ построена с учетом модели, предложенной в [12]). С учетом этого, выражение (12) можно переписать:

$$\Delta T_{jAV} \approx \frac{2}{3} P_{AV(pk)} Z_{th}(0.6\Delta t_{AV}) = \frac{2}{3} P_{AV(pk)} k_{AV}(0.6\Delta t_{AV}) R_{thj-c}. \quad (13)$$

Пиковое значение рассеиваемой мощности можно определить, как: $P_{AV(pk)} = 1.1 BV_{DSS} \cdot I_{max}$, тогда:

$$\Delta T_{jAV} \approx 0.73 BV_{DSS} I_{max} k_{AV}(0.6\Delta t_{AV}) R_{thj-c}. \quad (14)$$

Подставив в формулу (14) значения BV_{DSS} , I_{max} , R_{thj-c} и коэффициента $k_{AV}=0.009$, найденного по зависимости $k(t_p)$ для транзистора STF9NK90Z в корпусе TO-220FP для момента времени $0.6 \Delta t_{AV}=3.45 \cdot 10^{-5}$ с, находим максимальную температуру кристалла каждого ключа за время лавинного процесса: $T_{jmax}=T_{jstart}+\Delta T_{jAV}=27.6+0.73 \cdot 900 \cdot 5 \cdot 0.009 \cdot 3.1 \approx 119$ °С, что меньше допустимой температуры кристалла транзистора — 150 °С.

В методике, предложенной производителем транзисторов STF9NK90Z [8, 9], максимальная температура канала находится через эффективное (действующее) значение мощности P_{AV} , выделяемой в виде тепла при лавинном пробое и тепловой импеданс канал-корпус, найденный для импульса тока с длительностью равной длительности лавинного процесса Δt_{AV} :

$$\Delta T_{jAV} = P_{AV} Z_{thjc}(\Delta t_{AV}) = P_{AV} k_{AV}(\Delta t_{AV}) R_{thj-c}. \quad (15)$$

Для P_{AV} можно записать:

$$P_{AV} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t_{AV}} \left(1.1 BV_{DSS} \frac{I_{max}}{\Delta t_{AV}} (\Delta t_{AV} - t) \right)^2} dt = 1.1 BV_{DSS} \frac{I_{max}}{\sqrt{3}}. \quad (16)$$

Подставляя выражение (16) в (15), получаем:

$$\Delta T_{jAV} = 0.635 BV_{DSS} I_{max} k_{AV} (\Delta t_{AV}) R_{thj-c}. \quad (17)$$

Подставляя в (17) численные значения, находим приращение температуры канала транзистора за время лавинного пробоя: $\Delta T_{jAV} = 0.635 \cdot 900 \cdot 5 \cdot 0.011 \cdot 3.1 \approx 98^\circ\text{C}$.

Соответственно, температура кристалла каждого ключа после окончания лавинного процесса составит: $T_{jmax} = T_{jstart} + \Delta T_{jAV} = 27.6 + 98 \approx 126^\circ\text{C}$. Это значение также меньше предельно допустимой температуры канала транзистора — 150°C .

Таким образом, выполненные расчеты показали, что для используемых в ГИТ с ИНЭ транзисторов STF9NK90Z при работе генератора на холостом ходу в режиме максимального времени заряда ИНЭ все три условия, гарантирующие устойчивость MOSFET-ключа к однократному лавинному пробую, выполняются. Рассчитанные по двум методикам значения максимальной температуры канала силовых транзисторов ГИТ с ИНЭ при лавинном пробое — 119°C и 126°C — получены для начальной температуры канала транзисторов 25°C . Если ориентироваться на верхнюю границу диапазона рабочих температур ГИТ с ИНЭ — 40°C , то, согласно приведенным методикам расчета, устойчивость транзисторов генератора к однократному лавинному пробую сохраняется.

Необходимо отметить, что, как показали проведенные аналогичные расчеты для других типов MOSFET-транзисторов, при соблюдении условий: $I_{Dmax} \leq I_{AR}$ и $E_{AV} \leq E_{AS}$, температура канала при лавинном процессе может превышать допустимую. Следовательно, выполнение первых двух условий является необходимым, но недостаточным для оценки лавинной устойчивости конкретного транзистора к однократному пробую.

Выводы

Современные типы MOSFET-транзисторов позволяют использовать режим лавинного пробоя для защиты ключей от перенапряжений, возникающих при коммутации индуктивной нагрузки, в том числе и в случае, так называемого, незамкнутого индуктивного переключения (unclamped inductive switching), когда вся энергия, накопленная в индуктивности при открытом ключе, при закрытии ключа рассеивается транзистором при лавинном пробое. Чтобы режим лавинного пробоя не привел к термическому разрушению транзистора, необходимо при выборе конкретного типа MOSFET-ключа учитывать определенные условия его лавинной устойчивости (способности рассеять накопленную в индуктивности энергию).

Основным критерием лавинной устойчивости MOSFET-ключа в конкретном применении является условие, что максимальная температура канала транзистора за время лавинного процесса не превысит предельно допустимую температуру кристалла для данного типа транзисторов.

Как правило, производители сами предоставляют методику расчета максимальной температуры канала транзистора при лавинном пробое. Но, для повышения надежности расчетов, целесообразно использовать несколько альтернативных методик.

Необходимо внимательно изучить ту часть технической документации на транзистор, которая касается лавинного режима, так как некоторые

производители по ряду причин [10] занижают значение напряжения пробоя сток-исток BV_{DSS} . В таком случае необходимо при расчетах использовать, так называемое, эффективное значение $BV_{EFF.}$, которое, при отсутствии другой информации, можно принимать как $1.3 BV_{DSS}$.

Так как для одиночного импульса тока постоянная времени теплоотвода много больше постоянной времени кристалла, то применение дополнительных теплоотводов (радиаторов) не приводит к снижению температуры кристалла при однократном лавинном процессе. Для повышения лавинной устойчивости к однократному лавинному пробую в конкретном применении целесообразно либо выбрать другой тип MOSFET-ключа, либо использовать тот же транзистор, но с другим типом корпуса, обладающим меньшим тепловым сопротивлением кристалл-корпус.

Рассмотренная схема генератора импульсов тока с дросселем в качестве индуктивного накопителя энергии и MOSFET-ключей STF9NK90Z в качестве коммутаторов тока была использована при разработке и создании измерительного комплекса для определения стационарного сопротивления заземляющих устройств импульсным методом. Опытный образец комплекса прошел успешные стендовые и полевые испытания. Разработанный генератор позволил обеспечить надежную работу комплекса как при значительном сопротивлении токового контура — 1–4 кОм, так и в случае обрыва проводника линии с током.

Литература

1. Данилин А. Н., Колобов В. В., Селиванов В. Н., Прокопчук П. И. Методика импульсных измерений сопротивления растеканию заземлителей опор высоковольтных линий электропередачи под грозозащитным тросом // Техничко-экономические и электрофизические проблемы развития энергетики Севера. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2007. С. 79–85.
2. 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. 2016. № 13. С. 38–54.
3. Колобов В. В., Баранник М. Б., Селиванов В. Н., Куклин Д. В. Источник тока с индуктивным накопителем энергии для измерения импульсных сопротивлений заземляющих устройств // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 5. С. 61–67.
5. 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 // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. № 14. С. 13–28.
6. Lindblom A. Inductive pulse generation. Doctoral Thesis. Uppsala University. 2006. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:167979/fulltext01.pdf> (дата обращения: 01.10.2018).
7. N-channel 900 V, 1.1 Ω , 8 A, TO-220, TO-220FP, D2PAK, TO-247 Zener-protected SuperMESH™ Power MOSFET. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stp9nk90z.pdf>. (дата обращения: 05.10.2018).
8. Andrew Berry et al. The Power MOSFET Application Handbook: Design Engineer's Guide. NXP Semiconductors. Engineering design, 2016. 315p.

9. Giuffrida V. The avalanche issue: comparing the IAR and EAS parameters. Application note AN4337. STMicroelectronics. 2014. URL: <http://www.bdtic.com/download/st/AN4337.pdf>. (дата обращения: 02.08.2018).
10. Power MOSFET avalanche characteristics and ratings. Application note AN2344. STMicroelectronics. 2006. URL: http://www.elenota.pl/datasheet_download/163035/AN2344. (дата обращения: 02.08.2018).
11. Unclamped inductive switching (UIS) test and rating methodology. Application note AN1968. 2015. URL: <https://www.renesas.com/eu/en/www/doc/application-note/an1968.pdf>. (дата обращения: 02.08.2018).
12. Vishay. Power MOSFET avalanche design guidelines. Application note-1005, 2011. URL: <http://www.vishay.com/docs/90160/an1005.pdf>. (дата обращения: 08.08.2018).
13. A. Agnone, F. Chimento, S. Musumeci et al. A new thermal model for power MOSFET devices accounting for the behavior in unclamped inductive switching. // IEEE Power Electronics Specialists Conference. 2007. pp.1006-1012.
14. PLECS Standalone. The Independent Simulation Platform. URL: https://www.plexim.com/products/plecs_standalone. (дата обращения: 02.10.2018).
15. Борисов А. Устойчивость MOSFET транзистора к импульсам тока в индуктивной нагрузке // Компоненты и технологии 2005. №46. С. 40-42.
16. D. L. Blackburn Power MOSFET failure revisited // Records of the 19th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC '88. 1988. Vol. 2. pp. 681–688.

Сведения об авторах

Колобов Виталий Валентинович,

ведущий научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», 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 — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
эл.почта: maxbar@ien.kolasc.net.ru

А. В.Евстигнеев, В. В.Колобов

СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОДВЕСНЫХ ОПН

Аннотация

В данной статье описаны способы реализации устройства для контроля состояния подвесных ограничителей перенапряжения нелинейных с применением беспроводных технологий.

Ключевые слова:

ограничители перенапряжения нелинейные, беспроводная передача данных, сбор данных.

A. V. Evstigneev, V. V. Kolobov

THE APPROACHES OF DESIGN THE DEVICE FOR MONITORING THE STATE OF TRANSMISSION LINE ARRESTER

Abstract

In this article some approaches of implementation the device for monitoring the state of transmission line arrester using wireless data communication are described.

Keywords:

transmission line arrester, wireless data communications, data acquisition.

В последние годы наряду с подстанционными нелинейными ограничителями перенапряжений (ОПН), широкое применение находят защитные аппараты, предназначенные для защиты линейной изоляции воздушных линий электропередачи (ВЛ) [2].

Основными объектами такой защиты являются:

- высокие переходные пролеты через водоемы и другие преграды на рельефе трассы ВЛ;
- места на ВЛ с ослабленной изоляцией;
- двухцепные линии электропередачи с вертикальной подвеской проводов;
- места ВЛ, проходящей через районы с высокой грозопоражаемостью;
- районы с плохо проводящими грунтами и большим сопротивлением заземления опор;
- ВЛ на которых отсутствуют грозотросы.

В связи с широким применением защитных аппаратов такого типа возникает задача контроля их состояния и оценки остаточного ресурса для своевременного вывода ОПН из эксплуатации.

Задача осложняется тем, что количество подвесных ОПН может в несколько раз превосходить количество подстанционных ОПН и их распределением вдоль защищаемого объекта, который может составлять более 100 км. Закладывая безотказность наработки подвесного ОПН в районе первых десятков лет, можем получить в целом не надёжную систему. В то же время ранняя диагностика аппарата, могла бы предотвратить аварию на объекте в целом, позволить диспетчеру принять меры для последующих переключений способных перебросить передаваемую мощность на другие ВЛ.

Вышеизложенные проблемы определяют актуальность построения системы мониторинга и контроля разрядов в каждом ОПН с последующей передачей информации на пульт.

Данная задача может быть решена при помощи диагностического устройства [3] и модулей измерения импульсных токов ОПН [1, 4], разработанных в Центре физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН.

Ввиду особенностей расположения подвесных ОПН, для передачи информации о состоянии защитного аппарата измерительные модули необходимо дополнить устройством, обеспечивающим технологию беспроводной передачи данных.

Рассмотрим первый вариант построения устройства мониторинга линейных ОПН. В данной схеме используется основной микроконтроллер и радиочастотный трансивер. Основной микроконтроллер используется для измерения тока проводимости и регистрации срабатываний ОПН. В качестве основного можно использовать 8-ми либо 32-х битный микроконтроллер с RISC архитектурой. Радиочастотный трансивер подключается к основному микроконтроллеру (МК) посредством SPI интерфейса и является подчиненным по отношению к основному МК.

Второй вариант построения устройства основан на применении так называемых систем на кристалле (SoC). Данные интегральные микросхемы содержат в своем составе основное вычислительное ядро, используемое для пользовательских приложений, радиочастотное ядро, в памяти которого находится стек протоколов для беспроводной передачи данных, а также периферийные устройства (аналого-цифровой преобразователь, таймеры, часы реального времени и т.д.).

Преимущество наличия такого количества периферийных устройств позволяет с помощью только одного микроконтроллера построить такие блоки как измерения гармонического состава токов проводимости ОПН, регистрации импульсных токов ОПН с привязкой их к времени события, что в целом приведет к конечному снижению стоимости одного блока.

В качестве такой системы на кристалле рассмотрим микросхему фирмы Texas Instruments CC2650 (Рис. 1).

Данная микросхема поддерживает как стандартные протоколы беспроводной передачи данных (Bluetooth Low Energy, ZigBee/6LoWPAN), так и протоколы, определяемые пользователем. Предварительные оценки по дальности радиосвязи между блоками составляет более 500 метров, что возможно позволит устанавливать блоки не на каждой опоре ВЛ. Предлагаемая микросхема состоит из трех ядер, связанных между собой коммуникационными шинами.

Основное ядро (Main core) системы выполнено на основе 32-х битной архитектуры ARM Cortex-M3 и содержит в себе FLASH-память размером 128 килобайт для хранения пользовательской программы. Данное ядро предназначено для обработки данных, поступающих от периферийных устройств ядра, реализации прикладного уровня протокола передачи данных и т.д.

Радиочастотное ядро (RF core) выполнено на основе архитектуры ARM Cortex-M0. Во FLASH-памяти радиочастотного ядра записано проприетарное программное обеспечение, обеспечивающее стек протоколов беспроводной передачи данных.

Также в данной микросхеме присутствует ядро управления периферийными устройствами (Sensor controller). Данное ядро представляет собой 16-ти битный сверхмалопотребляющий контроллер и позволяет независимо от основного ядра работать и считывать информацию с периферийных устройств в энергосберегающих режимах.

Микросхема в большей части времени будет находиться в режиме пониженного потребления, в котором идут только часы реального времени, и пробуждаться во время импульсных токов ОПН и на моменты синхронизации по передаче информации по цепочке диспетчера. Применение недорогого литий-тионилхлоридного элемента питания, позволит блоку отработать без замены элемента питания около 20 лет.

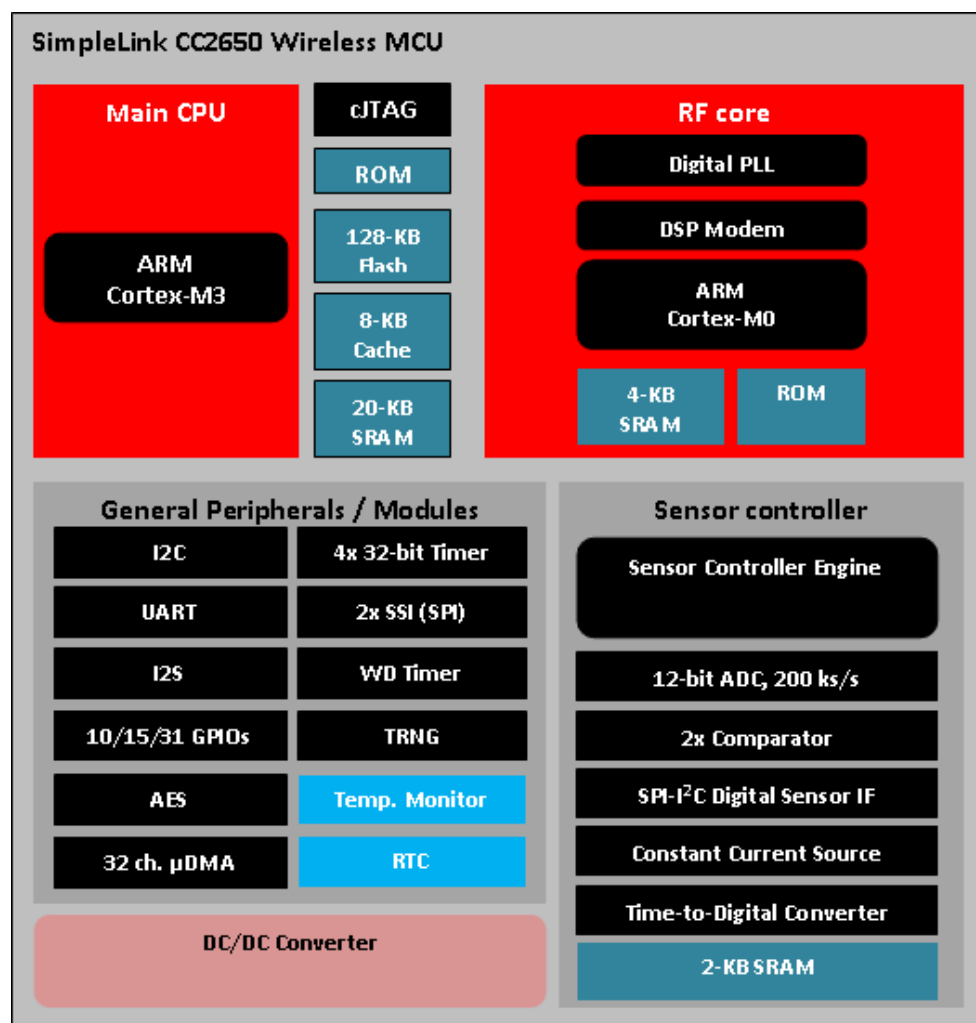


Рис. 1. Функциональная схема системы на кристалле CC2650

Fig. 1. Functional scheme of a system on crystal CC2650

Выводы

1. В связи с широким применением ОПН подвешенного типа, возникает задача контроля их состояния и оценки остаточного ресурса, которая осложняется особенностями расположения данных защитных аппаратов и их количеством на защищаемом объекте.

2. Современная элементная база позволяет реализовать устройства для контроля состояния ОПН с использованием системы на кристалле для беспроводной передачи данных, т.е. на одной микросхеме с применением небольшого количества внешних дискретных элементов.

3. Системы на кристалле позволяют организовать надежную сеть для беспроводной передачи данных, что особенно актуально, учитывая особенности расположения ОПН подвешенного типа, их количество и распределение вдоль защищаемого объекта.

Литература

1. Баранник М. Б. Разработка устройства регистрации импульсных токов, протекающих через ОПН под воздействием коммутационных и грозовых перенапряжений в процессе эксплуатации / М. Б. Баранник, В. В. Колобов, П.И.Прокопчук // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Вып. 6. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2013. С. 86–92.
2. Зубков А. С. Подвесные ОПН как средство повышения надежности работы воздушных линий электропередачи (опыт применения) / А. С. Зубков, В. В. Власов, А. В. Сухар // Третья научно-практическая конференция. Новосибирск, 2008. С. 201–208.
3. Баранник М. Б. «СКАТ-3» Прибор оперативной диагностики нелинейных ограничителей перенапряжения «СКАТ-3» / М. Б. Баранник, В. В. Колобов, Д. В. Куклин // Моделирование переходных процессов и установившихся режимов в высоковольтных сетях. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2008.
4. Баранник М. Б. Аспекты функциональной достаточности и электромагнитной совместимости устройств для регистрации срабатывания ОПН / М. Б. Баранник, А. В. Евстигнеев, В. В. Колобов // Труды КНЦ РАН Энергетика. Вып. 6. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2013. С. 101–107.

Сведения об авторах

Евстигнеев Артем Викторович,

инженер лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»,

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А

эл. почта: evstigneev@ien.kolasc.net.ru

Колобов Виталий Валентинович

ведущий научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»,

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А

эл. почта: l_i@mail.ru

О. В. Залесова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА НА ВЕЛИЧИНУ НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОТКЛЮЧЕННОЙ ВЛ

Аннотация

В работе рассматривается вопрос влияния грозозащитного троса на величину наведенного напряжения на отключенной воздушной линии электропередачи, вызванного электромагнитным влиянием тяговой сети переменного тока и действующей воздушной линии электропередачи 110 кВ. Представлены результаты расчетов наведенного напряжения для различных моделей размещения троса на ремонтируемой линии.

Ключевые слова:

грозозащитный трос, воздушная линия электропередачи, электрифицированная железная дорога переменного тока, электромагнитное влияние.

O. V. Zalesova

RESEARCH OF THE OVERHEAD GROUND-WIRE CABLE INFLUENCE ON THE VALUE INDUCED VOLTAGE IN DISCONNECTED OVERHEAD POWER LINE

Abstract

The paper discusses the effect of the overhead ground-wire cable on the value of induced voltage on the disconnected overhead power line caused by electromagnetic influence of the traction network and the operating power line 110 kV. The results of the induced voltage calculations are presented for various models of cable placement on disconnected overhead power line.

Keywords:

overhead ground-wire cable, overhead power line, AC electric railway, electromagnetic influence.

В электрических сетях для предотвращения возникновения перенапряжений или ограничения их величины применяются различные превентивные меры защиты. Так, от прямых ударов молнии, способных приводить к перекрытию изоляции и возникновению коротких замыканий в сетях, на воздушных линиях электропередачи (ВЛ) для защиты фазных проводов применяют грозозащитные тросы [1, 2]. В настоящей работе рассматривается вопрос влияния грозозащитных тросов, установленных на опорах отключенных ВЛ, на величину наведенного напряжения, возникающего на проводах этих линий.

В соответствии с Правилами устройства электроустановок [1] ВЛ класса напряжения 110–750 кВ с металлическими и железобетонными опорами должны быть защищены от прямых ударов молнии тросами на протяжении всей длины. Однако линии 110–500 кВ или их участки могут эксплуатироваться без тросовой защиты [1, 2, 3]:

- когда ВЛ расположена в районе со слабой грозовой активностью (менее 20 грозовых часов в году) и в горной местности (плотность разрядов на землю менее 1,5 на 1 км² в год);

- в районах с плохо проводящими грунтами (удельное сопротивление грунта более 1000 Ом·м);
- расположение ВЛ в особо гололедных районах (расчетная толщина стенки гололеда более 25 мм);
- для ВЛ с усиленной изоляцией провода относительно заземленных частей опоры в случае, когда расчетное число грозовых отключений ВЛ соответствует этой величине для линии данного класса напряжения снабженной грозозащитным тросом;
- когда трасса ВЛ проходит в районах с агрессивными уносами промышленных предприятий.

Исключения представляют линии 110–220 кВ, предназначенные для электроснабжения объектов добычи и транспорта нефти и газа. Они должны быть защищены от прямых ударов молнии тросами по всей длине независимо от интенсивности грозовой деятельности и удельного сопротивления земли [3].

Как правило, грозозащитные тросы располагают над фазными проводами. Их присоединяют непосредственно к заземленной опоре в конце анкерного участка длиной до 10 км путем устройства специальных перемычек на анкерной опоре, а на промежуточных опорах подвешивают на одном или двух изоляторах, зашунтированных искровым промежутком размером не менее 40 мм [2]. При большей длине анкерных пролетов количество точек заземления в пролете выбирается таким, чтобы при наибольшем значении продольной электродвижущей силы, наводимой в тросе при коротком замыкании на ВЛ, не происходил пробой искрового промежутка [1]. Количество тросов (один или два) зависит от класса напряжения линии, типа ее опор, интенсивности грозовой деятельности, а также от требований к надежности электроснабжения потребителей [4].

В Центре физико-технических проблем энергетики Севера КНИЦ РАН на протяжении многих лет выполнялись экспериментальные и теоретические исследования значений наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях электропередачи, вызванных влиянием смежных электрических сетей переменного тока. С учетом работ [5, 6] для настоящего исследования были определены три расчетные модели сближения отключенной ремонтируемой линии (РЛ) 110 кВ: 1) с тяговой сетью железных дорог переменного тока промышленной частоты, 2) с действующей ВЛ 110 кВ, размещенной на отдельных опорах, и 3) с действующей ВЛ 110 кВ в виде двухцепной линии. Схемы сближения объектов с их геометрическими параметрами представлены на рисунках 1 и 2 (*a*, *b*). Длины влияющих ВЛ и РЛ во всех случаях составляли 30 км, длина однопутного участка железной дороги — 60 км.

Параметры и физические свойства проводов исследуемых линий, а также проводов контактной сети и рельсов приведены в таблице 1. Для расчетов высоты подвеса проводов ВЛ были определены по методике, представленной в работе [5]. Высоты подвеса контактного провода и несущего троса принимались равными 5 м и 6 м соответственно. Питание влияющего участка железной дороги осуществлялось с двух тяговых подстанций одновременно. Рабочая нагрузка на влияющей ВЛ и в контактной сети однопутного участка (один электроподвижной состав) задавалась равной 300 А.

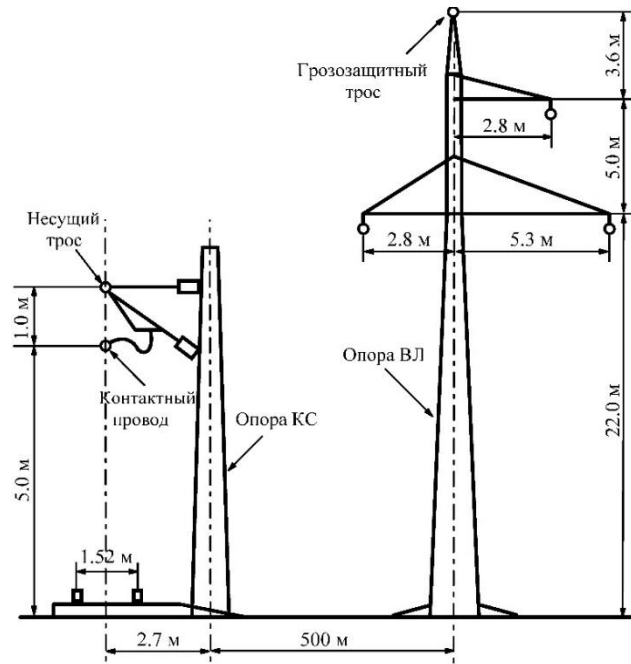


Рис. 1. Схема сближения ВЛ и контактной сети в поперечном разрезе

Fig. 1. Cross-section scheme of the power line and the railway contact system

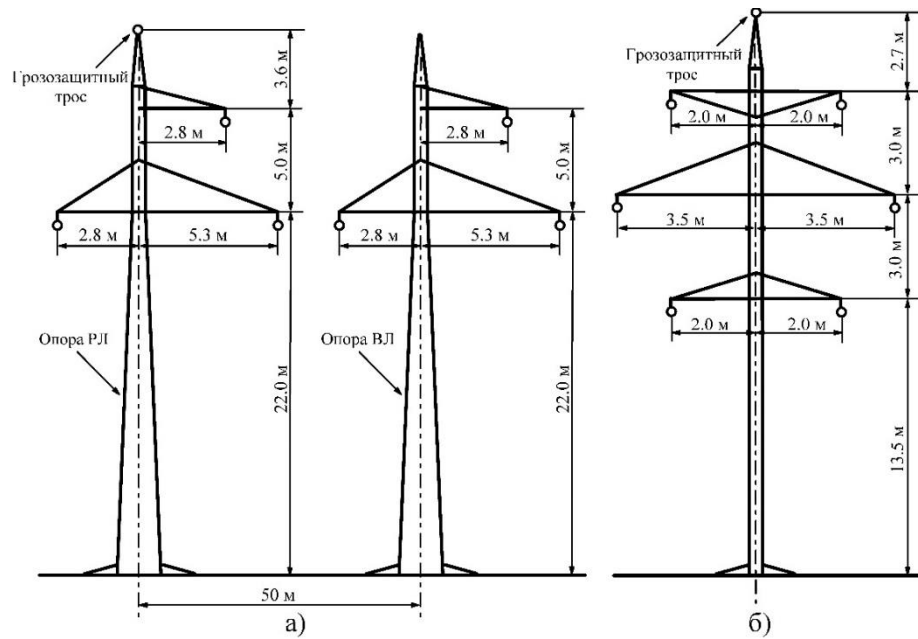


Рис. 2. Схема сближения ВЛ со смежной ВЛ в поперечном разрезе:
а — две индивидуальные линии; б — двухцепная линия

Fig. 2. Cross-section scheme of the power lines:
а — two individual lines; б — double-circuit line

Таблица 1

Параметры проводов тяговой сети и ВЛ с грозозащитным тросом
Table 1
Parameters of the traction network and the overhead power line

Параметр	Свойства				
	Контактный провод	Несущий трос	Рельс	Провод ВЛ	Грозозащитный Трос
Тип провода	ФМ-100	М-120	Р65	АС-150/24	ТК-50
Радиус провода (см)	0.6	0.7	5.1	0.86	0.46
Сопротивление постоянному току (Ом/км)	0.176	0.156	0.13	0.194	2.86

Расчеты наведенного напряжения на РЛ проводились для низкопроводящего грунта с удельным сопротивлением 1000 Ом·м (Арктический регион с числом грозových часов за 2014–2016 гг. порядка 30 [7]), соответственно сопротивление опор принималось равным 30 Ом, на подстанциях — 0,5 Ом.

Во втором и третьем случаях сближения на ремонтируемой и влияющих линиях были выполнены транспозиции фазных проводов (рис. 3).

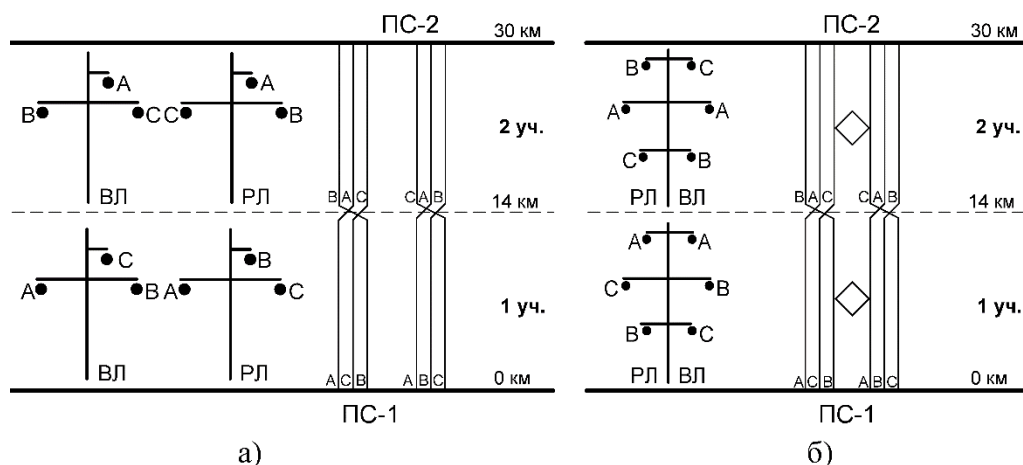


Рис. 3. Схема расположения транспозиций на РЛ и ВЛ:
а — две индивидуальные линии; б — двухцепная линия

Fig. 3. Scheme of transpositions location on the overhead power lines (OHL):
a — two individual lines; b — double-circuit line

Расчеты наведенного напряжения на РЛ выполнялись с помощью программного комплекса АТР-ЕМТР [8], который позволяет моделировать линии электропередачи и тяговые сети железных дорог на основе их физических параметров с учетом изменения геометрии взаимного расположения, и производить расчеты в различных режимах заземления ремонтируемой линии, задавая максимальные значения токов во влияющей сети.

Для каждого из трех рассматриваемых случаев сближения были построены следующие модели:

- 1) РЛ без тросовой защиты;
- 2) РЛ, оборудованная грозозащитным тросом только на подходах к подстанциям (по 2 км с каждой стороны);
- 3) РЛ защищенная тросом, разбитым на участки (по 2 км), каждый участок заземлен только с одного конца.

На основе утверждения представленного в работе [4] в расчетах по второй модели выполнялось одностороннее заземление троса в одной точке, вместо заземления троса на каждой опоре, выполненное на подходах линии к конечным распределительным устройствам подстанций. Необходимость разбиения грозозащитного троса, оснащенного на всем протяжении линии, на участки (третья модель) связана с прохождением в тросах тока промышленной частоты 50 Гц, наведенного магнитным полем фазных проводов. Данная мера способствует снижению потери активной мощности в линии.

В качестве примера на рисунке 4 (а, б) приведены модели сближения РЛ с тяговой сетью однопутного участка железной дороги и действующей ВЛ для третьего варианта, созданные в программе АТР-ЕМТР.

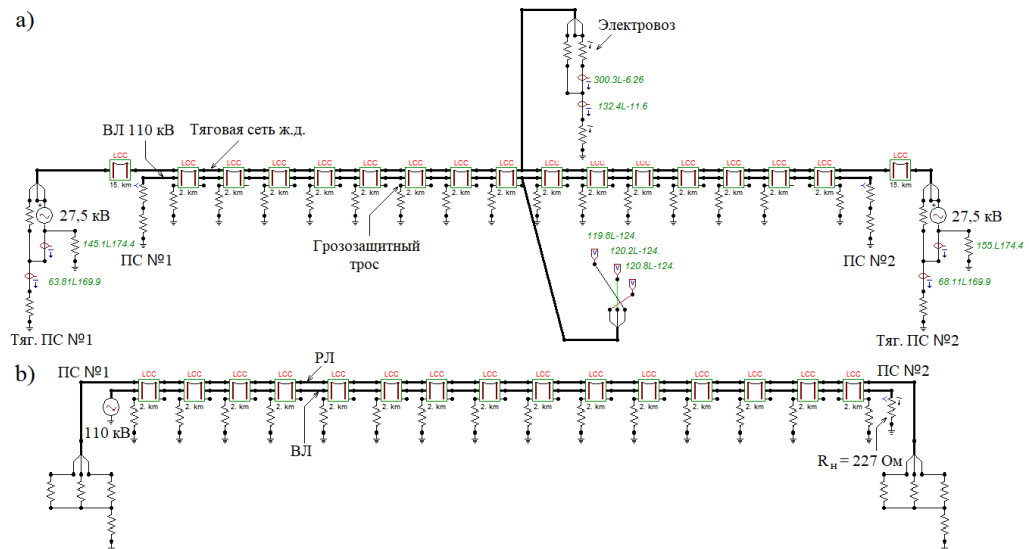


Рис. 4. Расчетные модели в программе АТР-ЕМТР:
а — РЛ с тяговой сетью железной дороги; б — РЛ с ВЛ

Fig. 4. Calculation models in the program ATP-EMTP:
а — the disconnected OHL with the electric traction network;
б — the disconnected OHL with the OH

Результаты расчетов для всех построенных моделей представлены в виде графиков на рисунке 5 (а, б и в). Здесь можно видеть, что для всех исследуемых моделей с грозозащитным тросом, значения наведенного напряжения на проводах ремонтируемой линии практически полностью совпадают с величиной наведенного напряжения, полученной с помощью модели без тросовой защиты. Таким образом, наличие троса никак не влияет на уровень наведенного

напряжения на ремонтируемой линии, за исключением случая, если бы трос, расположенный по всей длине линии, был без разрывов и заземлен в конце каждого анкерного участка. Последнее объясняется созданием замкнутых контуров, в которых под влиянием магнитного поля рабочего тока наводится э.д.с. В этом случае для модели двухцепной линии (при минимальной ширине сближения исследуемых объектов) уровень наведенного напряжения на проводах РЛ был бы в среднем на 15 % ниже данной величины для линии без троса, для двух других моделей сближения РЛ — на 3 %.

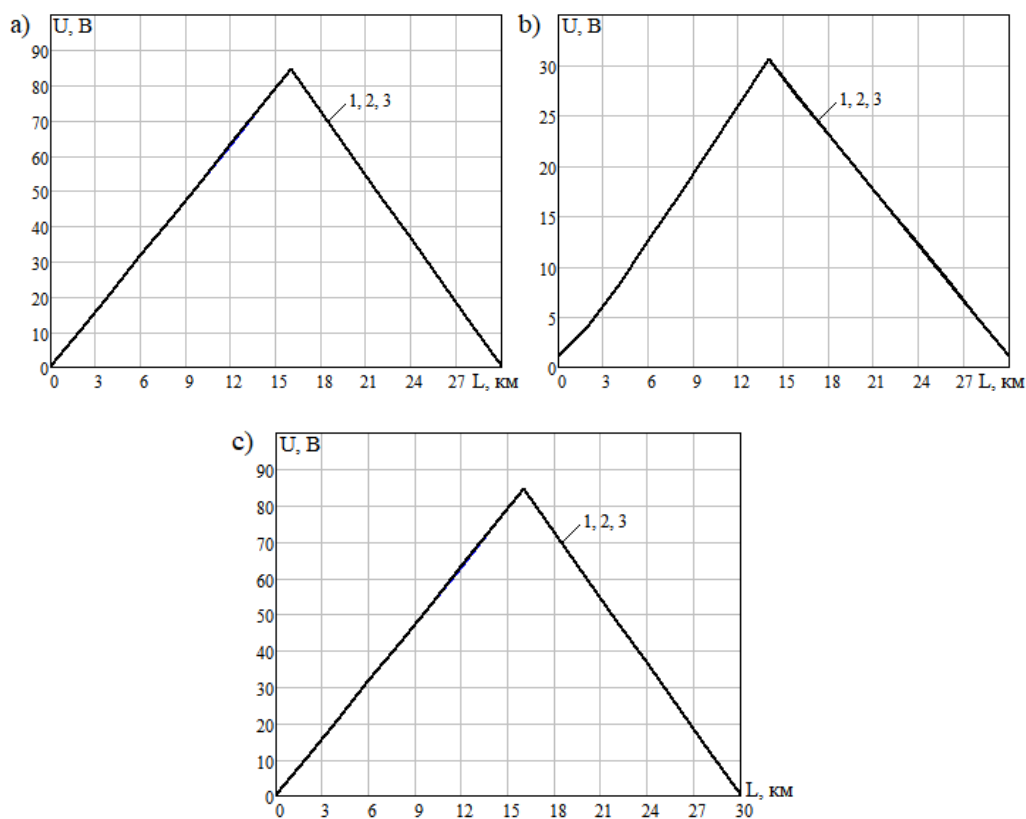


Рис. 5. Наведенное напряжение на РЛ для моделей:

- а — РЛ с тяговой сетью железной дороги; б — две индивидуальные линии;
 с — двухцепная линия, где:
 1 — без грозозащитного троса, 2 — трос установлен на подходах к подстанциям,
 3 — трос установлен на протяжении всей линии

Fig. 5. Induced voltage on the disconnected overhead power line for the models:
 a — the disconnected OHL with the electric traction network; b — two individual lines; c — double-circuit line, when: 1 — there is no the overhead ground-wire cable, 2 — the cable was installed on the approaches to the substations, 3 — the cable was installed throughout the line

Выводы

Результаты исследования зависимости уровня наведенного напряжения от оснащения отключенной линии электропередачи грозозащитным тросом, при различных схемах его размещения на линии, показали:

1. В случаях схем, когда трос установлен только на подходах к подстанциям или делится по всей длине линии на односторонне заземленные участки, что не позволяет создавать дополнительных замкнутых контуров с током, изменение значения наведенного напряжения на линии не наблюдается по отношению к данной величине для схемы без тросовой защиты.

2. Заметное снижение наведенного напряжения на РЛ было бы возможно только в случае, если грозозащитный трос проходит непрерывно вдоль всей линии с частым заземлением на концах анкерных участков и на подстанциях, когда ширина сближения между отключенной и влияющей линиями минимальна.

Литература

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Глава 2.5. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ (издание седьмое). Приказ Минэнерго России от 20.05.2003 № 187.
2. Халилов Ф. Х. Средства защиты от перенапряжений. Молниезащита и электромагнитная совместимость в электроэнергетике, 2012 г. 72 с.
3. СТО 56947007–29.240.01.221. 2016. Руководство по защите электрических сетей напряжением 110–750 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. ПАО «ФСК ЕЭС». 2016. 46 с.
4. Дмитриев М. В., Родчихин С. В. Грозозащитные тросы ВЛ 35–750 кВ. Выбор мест заземления // Новости ЭлектроТехники. 2017. № 2(104). С. 2–5.
5. Залесова О. В., Селиванов В. Н. Расчёт наведённого напряжения на отключённых линиях электропередачи 110 кВ // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. № 2 (28). С. 87–98.
6. Залесова О. В. Моделирование электромагнитного влияния контактной сети железной дороги на отключенные воздушные линии электропередачи с помощью программы АТР-ЕМТР // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19, № 4. С. 715–722.
7. Бурцев А. В. Опыт регистрации грозовой деятельности на Кольском полуострове с целью выбора средств молниезащиты воздушных линий электропередачи // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 355—357.
8. Селиванов В. Н. Использование программы расчета электромагнитных переходных процессов АТР-ЕМТР в учебном процессе. Вестник МГТУ, т. 12, № 1, 2009 г. С. 107–112.

Сведения об авторах

Залесова Ольга Валерьевна,

научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А

эл.почта: Drozdova_nord@mail.ru

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.109-116
УДК 621.314.235

А. Н. Данилин, А. А. Климов, А. С. Потокин

РАСЧЁТ ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ СОЛЕНОИДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГИН

Аннотация

В статье описывается определение оптимального соотношения между конструктивными параметрами обмоток разделительных соленоидов для достижения минимально возможной напряжённости электрического поля на поверхности провода и уменьшения вероятности межвиткового перекрытия по изоляции каркаса. Приведены расчётные зависимости напряжённости на поверхности витков от значений конструктивных параметров.

Ключевые слова:

ГИН, разделительные соленоиды, минимальная напряжённость электрического поля, шаг намотки.

A. N. Danilin, A. A. Klimov, A. S. Potokin

THE CALCULATION OF THE DESIGN PARAMETERS OPTIMAL RATIO FOR CHARGING INDUCTORS USED IN TECHNOLOGICAL MARX GENERATORS

Abstract

The paper presents the calculation of the optimal ratio between winding design parameters of the charging solenoids that is used to achieve possible minimum electric field intensity on the wire surface and reduce a probability of inter-turn insulation flashover. The calculated graphs of surface electric field intensities versus design parameters values are shown.

Keywords:

Marx generator, charging inductors, minimal electric field intensity, winding step.

Введение. В схемах генераторов импульсных напряжений Аркадьева-Маркса (ГИН), используемых в технологических установках, в качестве разделительных элементов между ступенями ГИН применяются соленоиды (рис. 1). Этим обеспечивается высокий КПД генератора. Как правило, соленоиды выполняются в виде цилиндрических катушек, намотка которых производится на диэлектрические каркасы, при этом сечение провода определяется величиной зарядного тока [1].

В эксплуатации при коммутации ГИН соленоиды подвержены двум видам воздействия: пондеромоторным силам сжатия обмотки соленоидов и высокими межвитковыми напряженностями. Размеры соленоидов ограничиваются расстояниями между конденсаторами ГИН.

Опыт эксплуатации ГИН показал, что оба эти воздействия при неправильном выборе конструкции соленоида приводят к аварийным ситуациям.

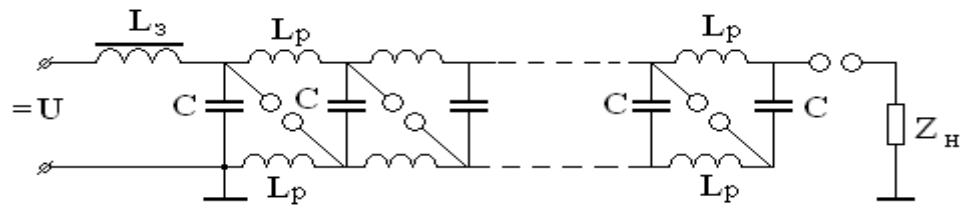


Рис. 1. Схема технологического ГИН:

L_3 — защитный дроссель; L_p — разделительные соленоиды;
 C — конденсаторы ступеней ГИН; Z_H — эквивалент нагрузки

Fig. 1. Electrical diagram of the technological Marx generator:
 L_3 — protecting inductor; L_p — charging inductor; C — capacitors;
 Z_H — equivalent load

Для исключения действия пондеромоторных сил фиксация витков катушки достигается выполнением достаточно глубоких канавок на каркасе катушки, в которые укладываются провода.

При напряженностях между витками, превышающих электрическую прочность зазоров между ними, происходят межвитковые перекрытия изоляции, разогрев каркаса и последующее его возгорание. По этой причине на практике имели место пожары генераторов. При заданных значениях сечения проводов, длины катушки, определяемой расстоянием между ступенями ГИН, и ее индуктивности, необходимо найти оптимум между этими параметрами.

Очевидно, что напряженность на поверхности проводов возрастает при снижении сечения проводов, а также при уменьшении межвиткового расстояния при увеличении сечения проводов. Отсюда следует, что при определенном соотношении межвиткового расстояния и диаметра сечения провода будет иметь место наименьшее значение напряженности на поверхности провода. Ниже приводится расчет этого соотношения.

Напряжённость электрического поля на поверхности витков. Если диаметр витка соленоида значительно больше шага намотки (т.е. можно пренебречь искажением поля на его изгибах), то напряжённость между двумя соседними витками с достаточной точностью можно описать уравнением напряжённости двухпроводной линии. Напряжённость поля в пространстве между проводниками двухпроводной линии с линейными плотностями заряда τ и $-\tau$ соответственно описывается уравнением:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \sqrt{\left(\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} - 2\frac{1}{r_1} \frac{1}{r_2} \cos\theta\right)} \quad (1)$$

где ϵ_0 и ϵ_r — диэлектрическая постоянная и относительная диэлектрическая проницаемость среды соответственно; r_1 и r_2 — расстояния до рассматриваемой точки от электрических осей проводников; θ — угол между векторами напряжённости при рассматриваемой точке.

Уравнение любой линии равного потенциала вокруг проводников имеет вид[2]:

$$U = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{r_2}{r_1} = k = \text{const} \quad (2)$$

причём данные линии являются окружностями с центрами в точках с координатами $x_0 = \frac{1+k^2}{|1-k^2|} h$ и $y_0 = 0$, и радиусом $R_0 = \frac{2k}{|1-k^2|} h$.

Потенциалы проводов определяются исходя из выражения:

$$\varphi_{1,2} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{H \pm h}{R} \quad (3)$$

Соответственно, напряжение между проводами описывается формулой

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{H+h}{H-h} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{(H+h)^2}{H^2-h^2} = \frac{\tau}{\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{H+h}{R} \quad (4)$$

Данное выражение соответствует окружностям равного потенциала с координатами центров в точках $x_0 = \pm H$ и $y_0 = 0$, и радиусом $R_0 = R$ (рис. 2). Т.е. данные линии (окружности) равного потенциала совпадают с окружностями сечения проводов.

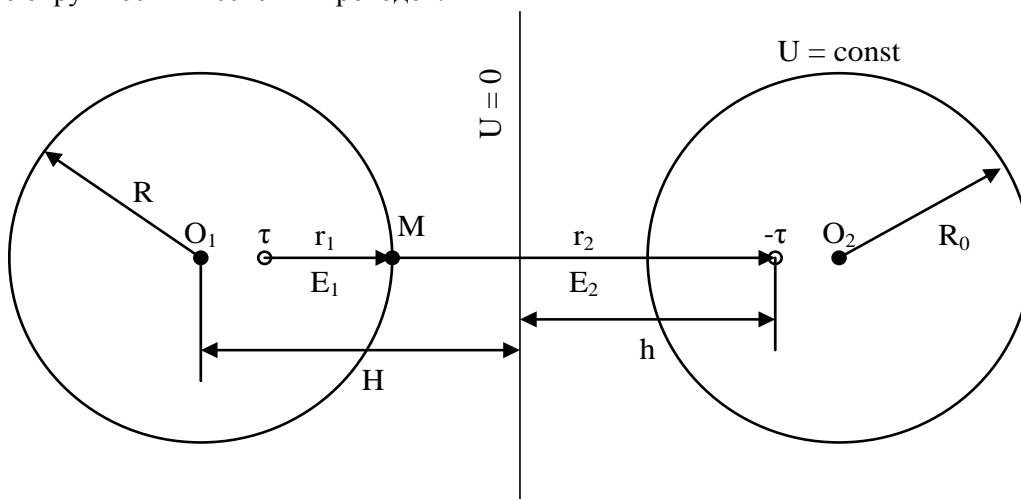


Рис. 2. Векторы напряжённости возле поверхности витка в точке с максимальным значением величины напряжённости поля (M)

Fig. 2. Electric field intensity vectors direction near the turn surface, at the point with maximum field intensity (M)

Максимальная напряжённость поля имеет максимум в точках у поверхности витков на оси, соединяющей центры сечения проводников (точка M на рис. 2), т.е.:

$$r_1 = h + R - H \quad r_2 = h + H - R \quad h = \sqrt{H^2 - r^2} \quad (5)$$

Тогда, подставив зависимости (4) и (5) в (1), получим выражение максимальной напряжённости у поверхности проводников:

$$E_{пов} = E_1 + E_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \left(\frac{h}{R(H-R)} \right) =$$

$$= \frac{Uh}{2R(H-R) \ln \frac{H+h}{R}} \quad (6)$$

Возле этих точек диэлектрик находится в самом напряжённом состоянии, и при повышении напряжения между проводами нарушение его электрической прочности начинается именно в этих точках. Образующая функцией напряжённости в этих точках при различных значениях переменных поверхность изображена на рисунке 3.

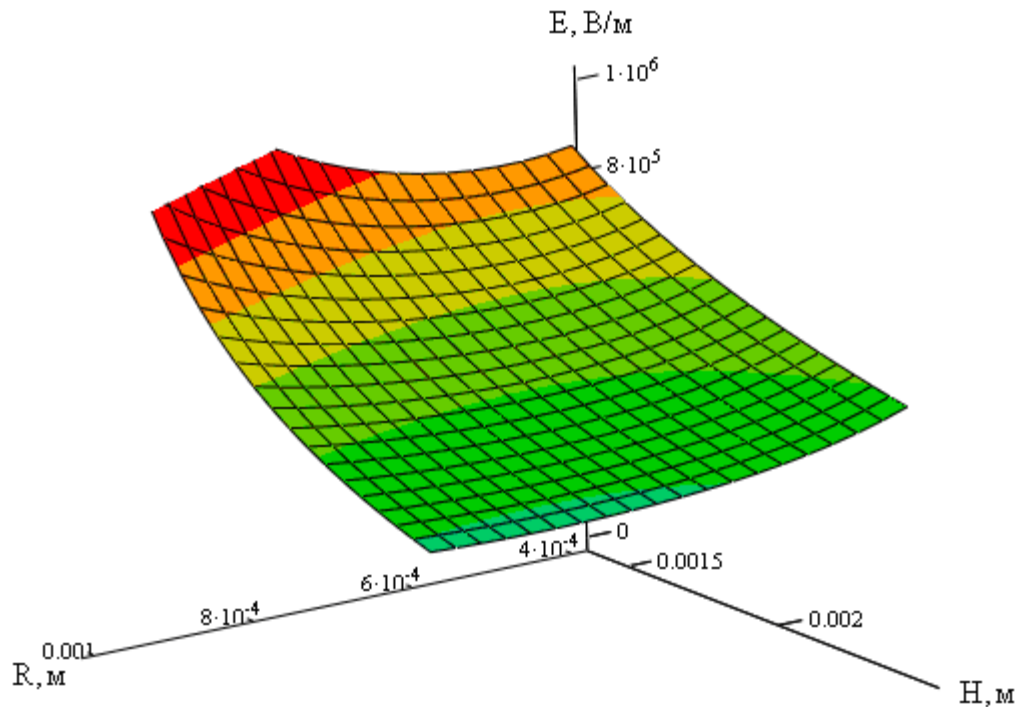


Рис. 3. Напряжённость на поверхности проводника при $U = 1000 \text{ В}$,
 $H = (1,4 \div 2,5) \times 10^{-3} \text{ м}$, $R = (0,4 \div 1,0) \times 10^{-3} \text{ м}$

Fig.3. Electric field intensity on the turns surface at the variables values: $U = 1000 \text{ V}$,
 $H = (1,4 \div 2,5) \times 10^{-3} \text{ m}$, $R = (0,4 \div 1,0) \times 10^{-3} \text{ m}$

При заданном шаге намотки сечение провода, при котором $E_{пов}$ минимально, можно определить из уравнения:

$$\frac{dE_{пов}}{dx} = 0, \text{ где } x = \frac{H}{R} \quad (7)$$

Подставив (7) в (6), получим:

$$E_{\text{пов}} = \frac{U}{2H} \cdot \frac{x \sqrt{\frac{x+1}{x-1}}}{\ln(x + \sqrt{x^2 - 1})} \quad (8)$$

На рис. 4 показана зависимость напряжённости у поверхности провода от соотношения H/R.

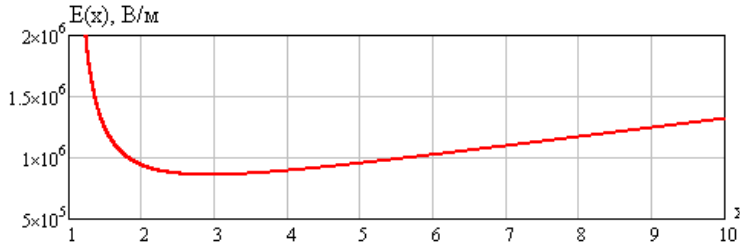


Рис. 4. Зависимость напряжённости на поверхности провода соленоида от соотношения между шагом намотки и диаметром проводника.

$$U = 1000 \text{ В}, H = 1,4 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Fig.4. Plot of the electric field intensity on the turn surface versus winding step to wire diameter ratio. $U = 1000 \text{ V}$, $H = 1,4 \times 10^{-3} \text{ m}$

Производная напряжённости по x:

$$E_x' = \frac{U}{2H} \left[\frac{\frac{\sqrt{x+1}}{\sqrt{x-1}}}{\ln(x + \sqrt{x^2 - 1})} - \frac{x \cdot \left[\frac{x+1}{(x-1)^2} - \frac{1}{x-1} \right]}{2 \cdot \frac{\sqrt{x+1}}{\sqrt{x-1}} \cdot \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})} - \frac{x \cdot \sqrt{\frac{x+1}{x-1}} \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 - 1}} + 1 \right)}{\left(\ln(x + \sqrt{x^2 - 1}) \right)^2 \cdot (x + \sqrt{x^2 - 1})} \right] =$$

$$= \frac{1}{2H \cdot \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})} \left[\frac{\left[\frac{x^2 - x - 1}{(x-1)^2} - \frac{\sqrt{\frac{x+1}{x-1}} \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 - 1}} + 1 \right)}{\ln(x + \sqrt{x^2 - 1})} \right]}{\frac{\sqrt{x+1}}{\sqrt{x-1}}} \right] = 0 \quad (9)$$

График производной напряжённости в точке M на поверхности витка соленоида в области неотрицательных значений переменной x изображён на рисунке 5.

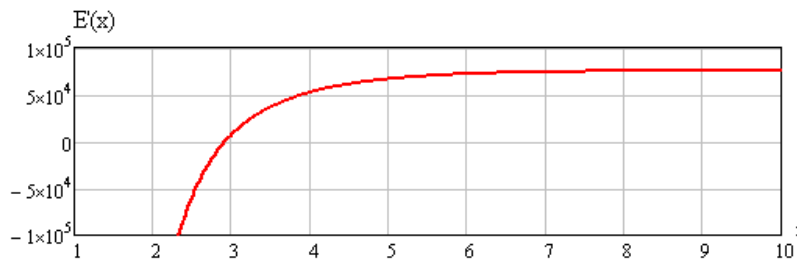


Рис. 5. Зависимость производной напряжённости на поверхности витка соленоида от соотношения между шагом намотки и диаметром проводника.

$$U = 1000 \text{ В}, H = 1,4 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Fig.5. Plot of the derived electric field intensity on the turn surface versus winding step to wire diameter ratio. $U = 1000 \text{ V}$, $H = 1,4 \times 10^{-3} \text{ m}$

Графоаналитическое решение этого уравнения даёт значение $x = 2,925$. Т.е. при заданном постоянном шаге намотки минимально возможная напряжённость поля на поверхности проводника достигается при таком диаметре провода, который находится с шагом в соотношении 2,925. Рисунок 6 показывает смещение минимально возможного значения напряжённости в зависимости от радиуса провода с увеличением значения половины шага намотки.

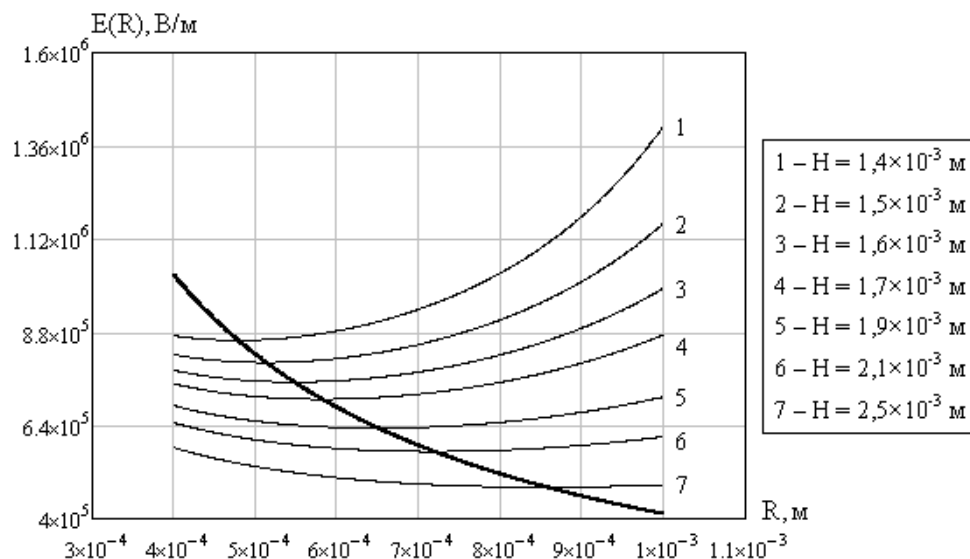


Рис. 6. Зависимости напряжённости на поверхности провода от его радиуса с изменением шага намотки при $U = 1000$ В и $R = (0,4 \div 1,0) \times 10^{-3}$ м. Утолщённой линией показана та же зависимость с использованием соотношения 2,925

Fig.6. Plots of the electric field intensity on the turn surface versus wire radius at different winding steps. Variables values: $U = 1000$ V and $R = (0,4 \div 1,0) \times 10^{-3}$ m The thickened line shows the same function with the 2,925 ratio.

Следует заметить, что, если оставить постоянным диаметр проводов и несколько увеличивать шаг между ними, нарушая соотношение в 2,925, то напряжённость поля всё равно будет снижаться. Однако такая конфигурация уже не будет обладать минимально возможной величиной напряжённости поля при данном увеличенном шаге. Это подтверждается графиками зависимости напряжённости на поверхности витка в точке М от половины шага намотки, изображёнными на рисунке 7.

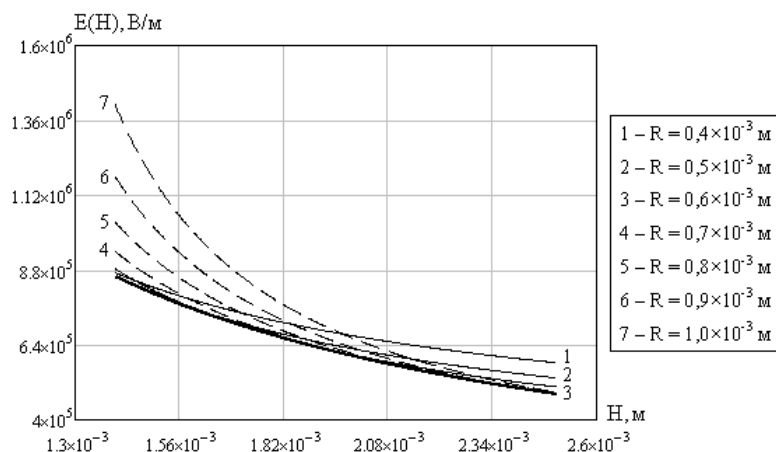


Рис. 7. Зависимости напряжённости на поверхности провода от половины шага намотки с изменением радиуса проводника при $U = 1000$ В и $H = (1,4\div 2,5)\times 10^{-3}$ м. Утолщённой линией показана та же зависимость с использованием соотношения 2,925

Fig.7. Plots of the electric field intensity on the turn surface versus half winding step at different wire radii. Variables values: $U = 1000$ V and $H = (1,4\div 2,5)\times 10^{-3}$ m The thickened line shows the same function with the 2,925 ratio.

Заключение. Расчётным образом показано существование оптимального соотношения для разделительных соленоидов между неизменным шагом намотки и диаметром намоточного провода круглого сечения для достижения минимально возможной электрической напряжённости поля на поверхности витка. Дальнейшее увеличение шага намотки свыше рассчитанного оптимального соотношения в 2,925 будет приводить к дальнейшему уменьшению напряжённости на поверхности проводников до минимума, который, в пределе, является величиной напряжённости поверхности единичного проводника. Однако такой способ уменьшения напряжённости сильно сказывается на габаритах и индуктивности разделительных соленоидов.

Литература

1. М. А. Бабилов, Н. С. Комаров, А. С. Сергеев: Техника высоких напряжений. 3-е изд. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1963. 671 с.
2. Нейман Л. Р., Демирчан К. С.: Теоретические основы электротехники. 2-е изд. М.-Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1967. 407 с.

Сведения об авторах:

Данилин Аркадий Николаевич,

заведующий лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 47А
эл. почта: danilin@ien.kolasc.net.ru

Климов Андрей Александрович,

инженер лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 47А

эл. почта: andreyclimov95@mail.ru

Потокин Александр Сергеевич,

младший научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 47А

эл. почта: electric.pulse@mail.ru

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.116-122

УДК 621.314.235

А. Н. Данилин, А. А. Климов

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ГРУППЫ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ОБЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

Аннотация

В статье рассмотрен механизм влияния взаимной индукции на производительность генераторов импульсного напряжения, подключенных параллельно к одному источнику питания, при их разряде на общую нагрузку. Приведены осциллограммы токов в разрядных контурах генераторов при их согласованном и встречном включении, а так же в контуре одиночного ГИН. Показано, что значения токов в нагрузке при наличии магнитной связи зависят от уровня взаимной индукции, что сказывается на производительности технологического процесса.

Ключевые слова:

генераторы импульсного напряжения, параллельное соединение, взаимная индукция

A. N. Danilin, A. A. Klimov

OPERATION MODES OF A HIGH VOLTAGE PULSE GENERATORS GROUP CONNECTED TO A SINGLE TECHNOLOGICAL LOAD

Abstract

The paper describes the mechanism of the influence of mutual induction on the efficiency of pulse voltage generators connected in parallel to the same power source while discharging on a single load. The oscillograms of the currents flowing in the discharge circuits with aiding and antiparallel connection of pulse generators as well as in the circuit with a single pulse generator are presented. It is shown that in the presence of magnetic coupling the load currents magnitudes depend on the level of mutual induction, which affects the efficiency of the technological process.

Keywords:

high voltage pulse generators, parallel connection, mutual induction.

Введение. В электроимпульсных технологиях широкое применение находят генераторы импульсного напряжения по схеме Аркадьева-Маркса (ГИН), а также батареи конденсаторов, разряжающиеся на нагрузку с последующим ее пробоем.

Технологии электроимпульсного разрушения твердых материалов и горных пород основаны на пробое твердых материалов, размещенных в жидкости, как правило, в воде. Одним из ограничений этого метода является предельно допустимая частота следования импульсов ГИН и емкостных батарей при разряде на указанную нагрузку. Ограничение основано на том, что при пробое и последующем разряде в районе канала образуется парогазовая область низкого сопротивления, которая «схлопывается» за какое-то конечное время. Этим временем определяется пауза между импульсами и допустимая частота разрядов ГИН.

В ряде случаев для увеличения производительности разрушения твердых материалов несколько ГИН включают параллельно, при этом заряд их конденсаторов производят от одного источника постоянного высокого напряжения, как показано на рис. 1.

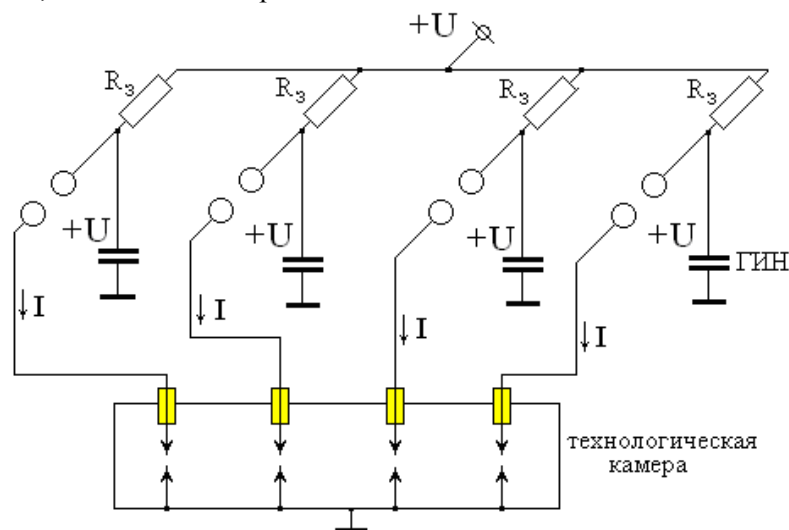


Рис. 1. Принципиальная схема параллельно включенных ГИН, разряжающихся на общую технологическую камеру с однонаправленными токами разряда

Fig. 1. Schematic diagram of the parallel high voltage pulse generators discharging on a single technological cell with the discharge currents flowing in the same direction

При создании таких установок имел место случай, когда производительность дробления материалов резко снижалась. На одном из горных предприятий была создана установка по схеме, приведенной на рис. 1 (установка «Кварц-М»). Предполагалось, что производительность повысится в 4 раза по сравнению с работой одиночного ГИН. Однако реально производительность дробления оказалась значительно ниже ожидаемой. Поиск причин этого показал, что при параллельном размещении контуров разряда генераторов имело место подавление токов в разряде за счет взаимной индукции.

Режимы параллельного включения генераторов. Рассмотрим переходные процессы в такой двухконтурной схеме (рис. 2). Если емкости ГИН в ударе равны, индуктивности контуров разряда одинаковы и одинаковы напряжения в разряде, то в операторной форме с учетом взаимной индукции переходные процессы описываются системой уравнений, при этом для упрощения решения будем считать, что $R_1 = R_2 = 0$.

$$\begin{aligned} U &= I_1 \left(\frac{1}{pC} + pL \right) + I_2 pM \\ U &= I_1 pM + I_2 \left(\frac{1}{pC} + pL \right) \end{aligned} \quad (1)$$

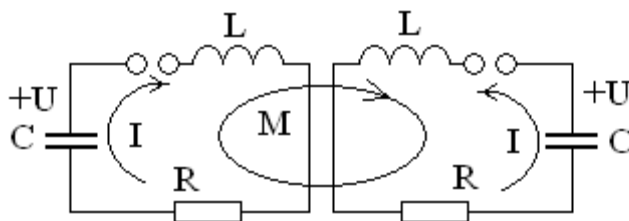


Рис. 2. Расчетная схема контуров с взаимной индукцией

Fig.2. Design scheme of the circuits with mutual inductance

В связи с полной симметрией параметров ГИН в стадии разряда токи их равны и переходный процесс описывается одним уравнением:

$$U = I \left[\frac{1}{pC} + p(L + M) \right] \quad (2)$$

Решив уравнение относительно тока и преобразовав его решение в оригинал, получим:

$$I = \frac{U}{\rho} \sin \omega t, \quad \text{где } \omega = \sqrt{\frac{1}{C(L + M)}}, \quad \rho = \sqrt{\frac{L + M}{C}} \quad (3)$$

При отсутствии взаимоиндукции: $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad \rho_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Коэффициент взаимоиндукции равен: $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$. Так как принято, что

$L_1 = L_2 = L$, то получим: $k = \frac{M}{L}$. Если принять, что между контурами сильная магнитная связь, то приближенно $L \rightarrow M$ и $k \rightarrow 1$. При этом получим ток:

$$I = \frac{U}{\sqrt{2}\rho_0} \sin \frac{\omega_0}{\sqrt{2}} t \quad (4)$$

И так, амплитуда тока при наличии взаимной индукции снижается на $\sqrt{2} \approx 1,41$.

Опыты по измерениям токов при работе одного генератора и двух индуктивно связанных генераторов дали реальный коэффициент снижения токов, равный 1,34. Было обнаружено двукратное снижение мощности в разряде. Это явление послужило причиной снижения производительности электроимпульсной установки «Кварц-М» по дроблению твердых материалов. Еще большее снижение тока происходило при работе четырех генераторов. Коэффициент снижения составил 1,63.

Выход из создавшейся ситуации был найден путем изменения схемы генераторов импульсов, которые обеспечивали создание в цепях разряда разнонаправленные токи (рис. 3). Схемы ГИН, обеспечивающие разнонаправленные токи в нагрузке приведены на рис. 4.

В этом случае в уравнениях (2) и (3) взаимная индукция имеет отрицательный знак (-M). При сильной связи волновое сопротивление контуров разряда ρ составит:

$$\rho = \sqrt{\frac{L - M}{C}}$$

За счет снижения величины ρ токи разряда возрастают, и производительность дробления увеличивается.

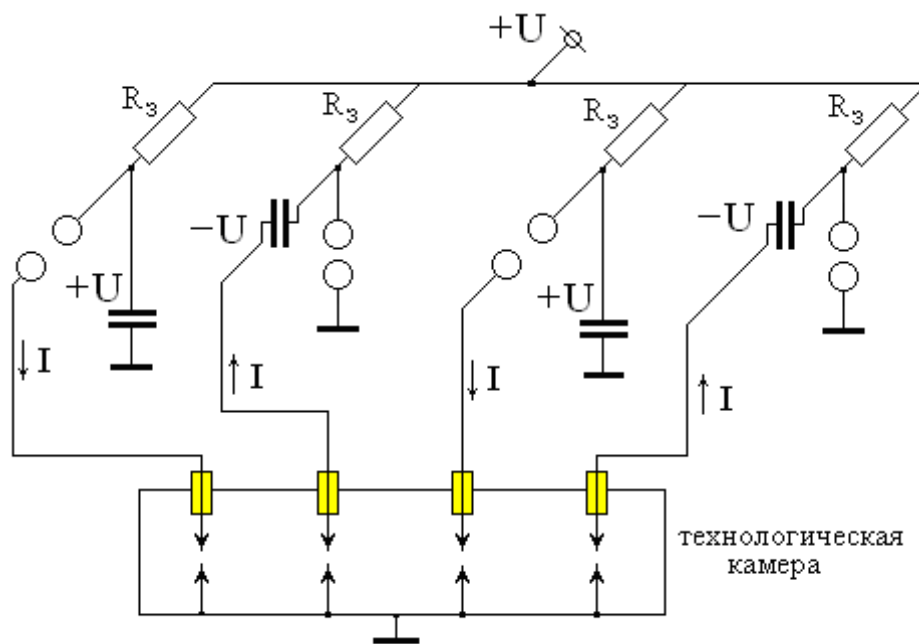


Рис. 3. Принципиальная схема параллельно включенных ГИН, разряжающихся на общую технологическую камеру с направленными встречно токами разряда

Fig.3. Schematic diagram of the parallel high voltage pulse generators discharging on a single technological cell with the discharge currents flowing in the opposite directions

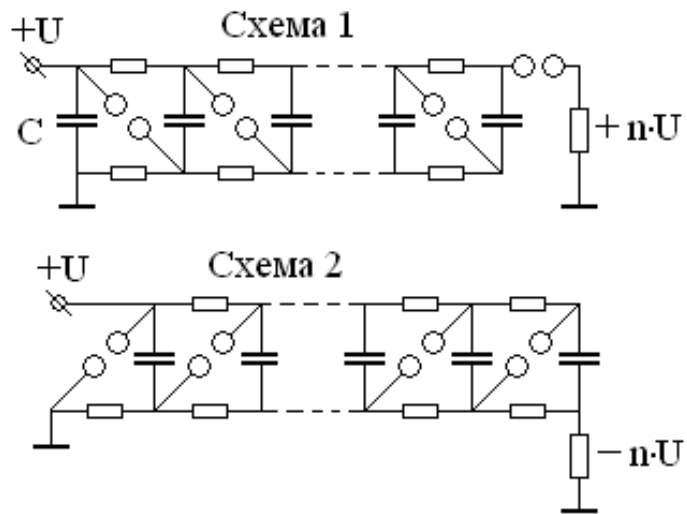


Рис. 4. Схемы ГИН, обеспечивающие разнонаправленные токи в нагрузке

Fig. 4. Diagrams of the Marx generators providing oppositely directed currents in load

Для уточнения параметров взаимного влияния в лаборатории были выполнены опыты на моделях этих схем в двухконтурном варианте (рис. 5). Здесь схема № 1 — для определения тока в отсутствии взаимоиндукции, схема № 2 — схемы с взаимоиндукцией при однонаправленных токах (согласное включение ГИН) и схема № 3 — схемы с взаимоиндукцией при разнонаправленных токах (встречное включение ГИН). Размеры контуров разряда в диаметре примерно 1 м, расстояние между контурами — 0,2 м.

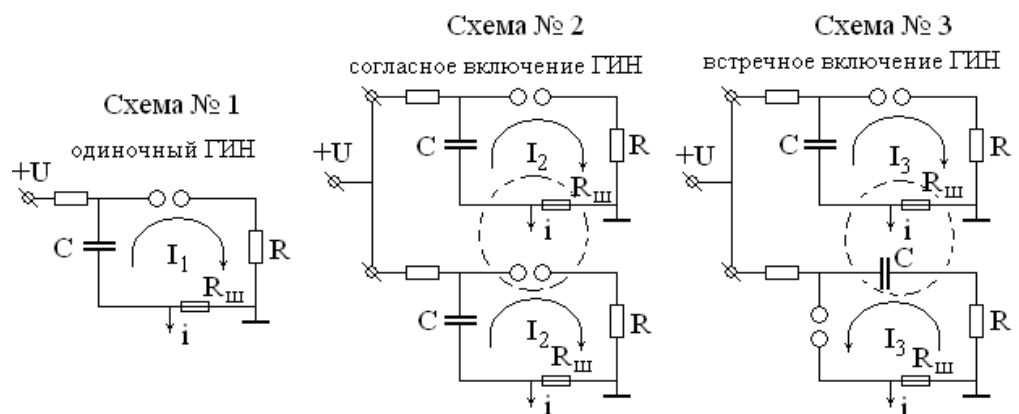


Рис. 5. Варианты схем для оценки влияния взаимоиндукции на величины токов

Fig. 5. Variants of circuits for evaluation of the effect of mutual induction on the currents magnitudes

Результаты опытов, выполненных на схемах рис. 6, приведены на осциллограммах (рис.6).

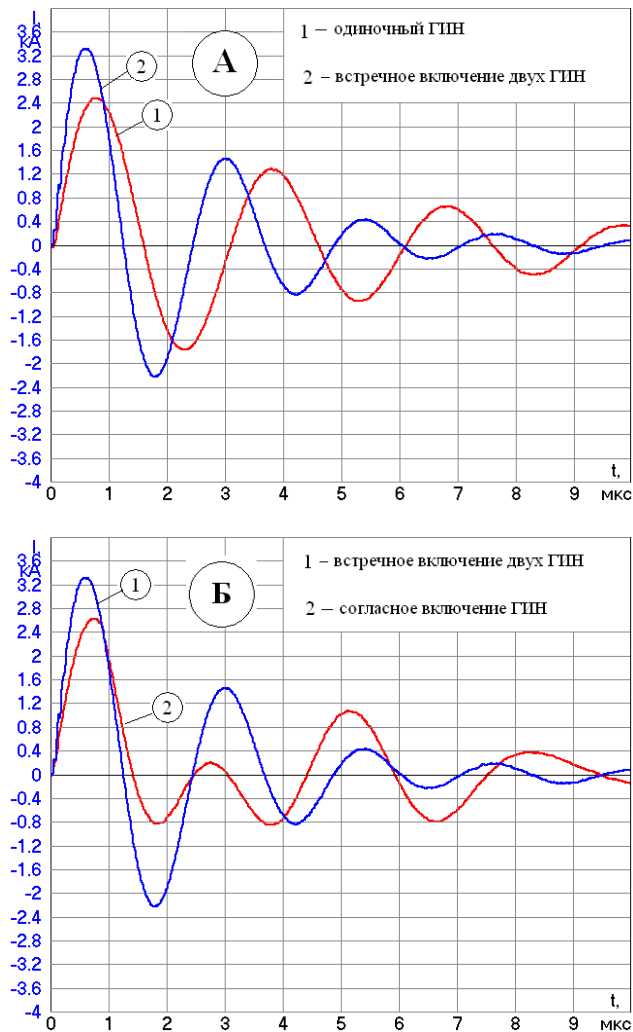


Рис. 6. Сравнение осциллограмм тока одиночного ГИН и тока в контуре при встречном включении ГИН (А), а также токов в контурах ГИН при их встречном и согласном включении (Б)

Fig. 6. Oscillograms of the currents flowing in the circuits with a single pulse generator and with antiparallel connected pulse generators (А), as well as in the circuits with aiding and antiparallel connection of pulse generators (Б)

Закключение. Сравнение показывает, что ток в контурах возрастает при встречном включении генераторов по сравнению с током одиночного ГИН, а также по сравнению с токами при согласном включении генераторов. Амплитуды токов возросли в 1,32 раза. Переналадка ГИН установки «Кварц-М» на чередующиеся схемы (рис. 4) позволила увеличить эффективность разрушения породы даже по сравнению с работой одиночного ГИН.

Литература

1. Г. М. Гончаренко, Л. Ф. Дмоховская, Е. М. Жаков: Испытательные установки и измерительные устройства в лабораториях высокого напряжения. М.: Энергия. 1966. 159 с.
2. Фрюнгель Ф.: Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов, пер. с нем. М.-Л.: Энергия. 1965. 488 с.
3. М. А. Бабилов, Н. С. Комаров, А. С. Сергеев: Техника высоких напряжений. 3-е изд. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1963. 671 с.

Сведения об авторах:

Данилин Аркадий Николаевич,

заведующий лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ЦЭС КНЦ РАН).

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 47А

эл. почта: danilin@ien.kolasc.net.ru

Климов Андрей Александрович,

инженер лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ЦЭС КНЦ РАН).

Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 47А

эл. почта: andreyclimov95@mail.ru

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.122-126

УДК 621.311

В.В.Ивонин

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОДОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ С ОДИНАКОВОЙ ПЛОЩАДЬЮ ПОВЕРХНОСТИ

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментальных исследований импульсных сопротивлений электродов различной формы и конфигурации, имеющих одинаковую площадь поверхности. Показано, что геометрические размеры заземлителей оказывают большое влияние на величину как стационарного, так и импульсного сопротивления заземлителей.

Ключевые слова:

искрообразования в грунте, ионизация грунта, заземление.

V.V. Ivonin

RESEARCH OF IMPULSE RESISTANCES OF DIFFERENT TYPES GROUNDING ELECTRODES WITH EQUAL SURFACE AREA

Abstract

The results of experimental studies of electrodes impulse resistances of various shapes and configurations with the same surface area are presented. It is shown that the geometrical dimensions of grounding electrode have a great influence on the magnitude of both stationary and impulse resistance of electrode.

Keywords:

sparkling in soil, soil ionization, grounding.

Введение

При ударе молнии в заземляющие устройства возникает быстроменяющийся многокилоамперный ток, который воздействует на грунт и вызывает искрообразование, в результате чего и свойства грунта и электрические характеристики заземления могут отличаться в несколько раз от величин, полученных при протекании слабого стационарного тока [1]. Механизмы возникновения электрического пробоя и развития разряда в сложной дисперсной среде, которой является влажный грунт, может отличаться от традиционного лидерно-стримерного механизма. Наличие дисперсной фазы из диэлектрических частиц существенным образом влияют на пробой, а также на растекание сильных импульсных токов. Решение данной проблемы особенно актуально в настоящее время в связи с массовым внедрением в энергетику информационных и управляющих систем на основе микроэлектроники и микропроцессорной техники, имеющей повышенную чувствительность к возникающим перенапряжениям.

При растекании больших импульсных токов в грунте электрические свойства самого грунта, как 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 [2]. При увеличении импульсного тока в грунте происходит ионизация и образуются искры, в результате чего сопротивления 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 [3]. Ионизация в грунте, сопровождающаяся образованием искровых каналов, начинается при напряженности электрического поля $E=4-16$ кВ/см.

Данная работа посвящена исследованию импульсных характеристик электродов разной формы и конфигурации, но имеющих одинаковую площадь поверхности.

Описание эксперимента

Для проведения экспериментов на заземлителях соизмеримых по размерам с заземлителями реальных объектов электроэнергетики был создан высоковольтный полигон на месте бывшего песчаного карьера вблизи города Апатиты [4]. Удельное сопротивление грунта на полигоне составило 1100 Ом*м. В качестве источника импульсов использовался генератор импульсных напряжений (ГИН), выполненный по схеме Аркадьева-Маркса. Питался ГИН от АИД-70, который был подключен к бензогенератору (рис. 1). ГИН состоял из 6 ступеней, в результате выходное напряжение ГИН лежало в промежутке от 60 до 360 кВ. Заземляющее устройство генератора состояло из двух соединенных между собой контуров: внешнего квадрата со стороной 6 м и внутреннего со стороной 2,5 м. В качестве элементов ЗУ использовались стальные полосы шириной 50 мм и толщиной 4 мм. По углам внутреннего контура были вбиты вертикальные электроды диаметром 20 мм и длиной 1 м. Сопротивление контура заземления 66 Ом.

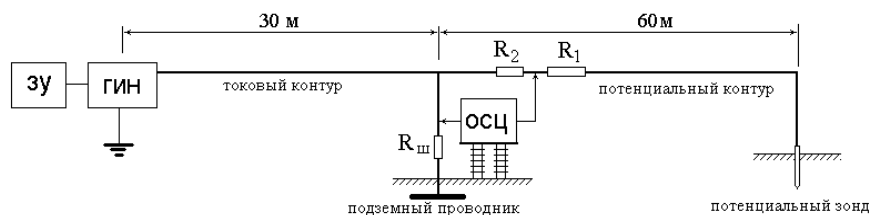


Рис. 1 Схема проведения эксперимента

Fig. 1 The scheme of the experiment

В качестве электродов использовались:

- Стержень диаметром 12 мм и длиной 4,85 м;
- Труба диаметром 42 мм и длиной 1,5 м;
- Шар диаметром 340 мм. Шар закапывался наполовину для однородного распределения электромагнитных полей.

Площадь поверхности всех электродов 1816 см².

Вторым этапом работ были эксперименты на моделях горизонтальных заземлителей, состоящих из разного количества лучей, но имеющих одинаковую длину 16 м (рис.2). Заземлители выполнялись из провода диаметром 3 мм.

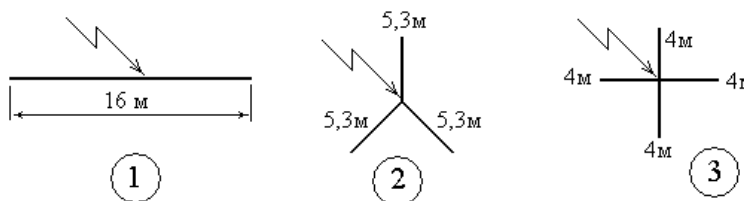


Рис. 2. Модели заземлителей

Fig. 2. Grounding electrodes model

Результаты

В первой серии экспериментов измерялось стационарное сопротивление всех электродов, а также импульсное сопротивление при воздействии импульса амплитудой 168 кВ и 300 кВ. В таблице 1 указаны измеренные значения стационарных и импульсных сопротивлений всех типов электродов.

Таблица 1

Измеренные сопротивления всех типов электродов

Measured resistances of all types electrodes

Тип электрода	Стационарное сопротивление, Ом	Импульсное сопротивление (U=168 кВ), Ом	Импульсное сопротивление (U=300 кВ), Ом
Стержень (d=12 мм, L=4,85 м)	785	280	230
Труба (d=42 мм, L=1,5 м)	1500	410	540
Шар (d=340 мм), закопанный наполовину	3250	1100	650

Как видно из таблицы геометрические размеры заземлителей оказывают большое влияние на величину как стационарного, так и импульсного сопротивления заземлителей. Увеличение неоднородности электрического поля на поверхности электрода приводит к тому, что при одинаковой площади поверхности и равных амплитудах импульсов напряжения наименьшее импульсное сопротивление — 280 Ом имеет стержневой заземлитель, а наибольшее полусфера — 1100 Ом. Импульсное сопротивление трубы лежит между этими значениями и составляет 540 Ом. Таким образом, величина импульсного сопротивления может уменьшаться почти в 4 раза только путем изменения формы заземлителя за счет локального увеличения напряженности электрического поля на поверхности электрода, что приводит к образованию множественных искровых каналов.

Во второй серии экспериментов измерялось импульсное сопротивление заземлителей с разным количеством лучей, но одинаковой общей длиной при воздействии импульсов амплитудой 210 кВ и 360 кВ. В таблице 2 приведены измеренные значения импульсных сопротивлений заземлителей.

Таблица 2

Значения импульсного сопротивления заземлителей, состоящих из разного количество лучей

Impulse resistance of grounding consisting of different number of electrodes

Импульсное напряжение ГИН (кВ)	Число лучей		
	2	3	4
210 кВ	120	125	130
360 кВ	100	105	115

На рисунке 3 представлена зависимость импульсного сопротивления заземлителя от количества лучей, из которых он состоит. Как видно из рисунка за счет взаимного экранирования с ростом числа лучей общее сопротивление заземлителя возрастает.

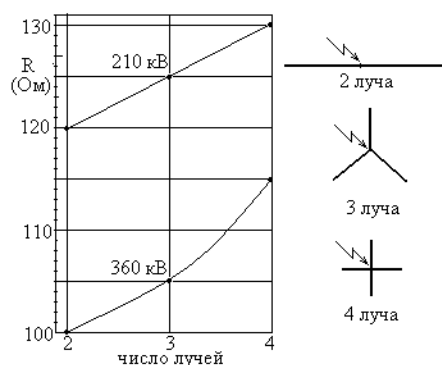


Рис. 3. Зависимость импульсного сопротивления заземлителя от количества лучей

Fig. 3. The dependence of impulse resistance of grounding consisting of different number of electrodes

Заключение

В работе показано, что для более эффективной работы заземления при воздействии больших импульсных токов необходимо применять стержневые протяженные заземлители малого диаметра, состоящие из наименьшего количества лучей. Механизм такой работы заключается в том, что развитие плазменных каналов изменяет не только эффективный диаметр заземлителя, но и увеличивает эффективную длину проводника за счет прорастания плазменных каналов с торца стержневого электрода, где велика плотность тока и велика напряженность электрического поля и неоднородность электрического поля [5, 6]. Этот механизм похож на механизм прорастания лидера при импульсном электрическом пробое длинных воздушных промежутков при атмосферном давлении.

Литература

1. Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Панов В. А., Печеркин В. Я., Сон Э. Е. Нелинейное растекание импульсного тока и электрический пробой в грунте // Теплофизика высоких температур. Том 52. № 6. 2014. С. 825.
2. Ивонин В. В., Данилин А. Н., Ефимов Б. В., Колобов В. В., Селиванов В. Н., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Сон Э. Е. Оптические исследования искровых каналов в грунте при растекании импульсного тока // Прикладная физика, 2015, № 4. С. 50–54.
3. Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P., Panov V. A., Son E. E., Efimov B.V., Danilin A. N., Kolobov V. V., Selivanov V. N., Ivonin V. V. Electrical breakdown of soil under nonlinear pulsed current spreading // Journal of Physics D: Appl. Phys. 2015. V. 48. P. 285201.
4. Ивонин В. В., Данилин А. Н. Исследование распределения потенциалов на поверхности грунта вокруг протяженного заземлителя // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2015. Вып. 11. С. 4–9.
5. Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Панов В. А., Печеркин В. Я., Сон Э. Е. Электрический пробой при растекании импульсного тока в песке // Прикладная физика, 2014, № 4. С. 20–25.
6. Ивонин В. В., Данилин А. Н., Ефимов Б. В., Колобов В. В., Селиванов В. Н., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Сон Э. Е. Оптические изображения искровых каналов при растекании импульсных токов в грунте // Успехи прикладной физики, 2016. Том 4, № 4. С. 355–361.

Сведения об авторах

Ивонин Виктор Владимирович,

научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д.21А

Эл.почта: ivonin@ien.kolasc.net.ru

