



Российская Академия Наук

ТРУДЫ

Кольского научного центра РАН

7/2014 (26)

ЭНЕРГЕТИКА

выпуск 9

Апатиты
2014

Российская Академия Наук

ТРУДЫ

Кольского научного центра

7/2014 (26)

издается с декабря 2010 г.

УДК 621.314

ISBN 978-5-91137-290-3

Главный редактор – академик РАН В.Т. Калинин

Заместители главного редактора:
д.г.-м.н., проф. В.П. Петров,
д.т.н., проф. Б.В. Ефимов

Редакционный совет:

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

ЭНЕРГЕТИКА

выпуск 9

Редколлегия серии «Энергетика»:

д.т.н. Б.В. Ефимов (отв. ред., энергетика),
д.т.н. А.А. Жамалетдинов (электрофизика),
д.т.н. Н.В. Коровкин (теоретическая
электротехника),
д.т.н. Ф.Х. Халилов (электроэнергетика),
к.т.н. Б.Г. Баранник (энергетика),
к.т.н. Н.И. Гумерова (электроэнергетика)
к.т.н. А.Н. Данилин (электроэнергетика),
к.т.н. В.А. Минин (возобновляемые источники
энергии),
к.т.н. Ю.М. Невретдинов (электроэнергетика),
к.т.н. В.Н. Селиванов (электроэнергетика),
к.т.н. А.Ф. Усов (электротехнологии)

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

© Центр физико-технических проблем энергетики Севера, 2014
© Кольский научный центр Российской академии наук, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ	
Ефимов Б.В., Гумерова Н.И., Селиванов В.Н.	Оптимизация схем замещения линий электропередачи в расчетах развития грозových перенапряжений на подходах к подстанциям..... 5
Колобов В.В., Баранник М.Б.	Опыт эксплуатации устройства регистрации импульсных токов, протекающих через ОПН под воздействием коммутационных и грозových перенапряжений..... 13
Данилин А.Н., Ивонин В.В.	Высоковольтный полигон для исследования процессов искрообразования в грунтах при стекании больших импульсных токов с заземлителей..... 26
Данилин А.Н., Ивонин В.В.	Зондовые измерения процессов растекания импульсных токов в увлажненном грунте..... 31
Бурцев А.В., Невретдинов Ю.М., Смирнов А.А.	Лабораторные экспериментальные исследования импульсных характеристик силового трансформатора..... 35
Усов А.Ф., Потокин А.С.	Импульсное трансформирование напряжения и энергии для электроимпульсного разрушения материалов..... 40
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ	
Залесова О.В., Якубович М.В.	Наведенные напряжения на отключенных воздушных линиях электропередачи, вызванные воздействием тяговой сети железной дороги переменного тока..... 50
Колобов В.В., Баранник М.Б., Прокопчук П.И.	Генератор КНЧ-диапазона для глубинных электромагнитных зондирований с использованием ЛЭП специального назначения..... 62
Куклин Д.В.	Сравнение напряжений на верхней фазе для различных заземлителей при ударе молнии в линию с грозотросом... 86
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ	
Клюкин А.М., Кузнецов Н.М., Трибуналов С.Н.	Международное сотрудничество по повышению эффективного управления энергопотреблением в Баренц-регионе..... 93
Минин В.А.	Характеристика теплоснабжения небольших населенных пунктов Мурманской области..... 98

Russian Academy of Sciences

7/2014 (26)

transactions

Kola Science Centre

UDC 621.314

ISBN 978-5-91137-290-3

Editor-in-Chief – V.T. Kalinnikov, Academician of RAS

Deputy Editors-in-Chief:
V.P. Petrov, Dr.Sc.
(Geology and Mineralogy),
B.V. Efimov, Dr.Sc.
(Engineering)

Editorial Council:

G.G. Matishov, Acad. of RAS,
N.N. Melnikov, Acad. of RAS,
V.K. Zhironov, Cor. Member of RAS,
A.N. Nikolaev, Cor. Member of RAS,
Yu.L. Voitehovskiy, Dr.Sc. (Geology and Mineralogy),
F.D. Larichkin, Dr.Sc. (Economics),
V.A. Masloboev, Dr.Sc. (Engineering),
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, Dr.Sc. (Geology and Mineralogy) –
Executive Secretary

ENERGY TECHNOLOGY

Series 9

Editorial Board of Energy Technology Series:

B.V. Efimov, Dr.Sc. (Eng.), Executive Editor,
power industry,
A.A. Zhamaletdinov, Dr.Sc. (Eng.), electrophysics,
N.V. Korovkin, Dr.Sc. (Eng.), theoretical
electrotechnology,
F.Ch. Khalilov, Dr.Sc. (Eng.), power engineering,
B.G. Barannik, PhD (Eng.), power industry,
N.I. Gumerova, PhD (Eng.), power engineering,
A.N. Danilin, PhD (Eng.), power engineering,
V.A. Minin, PhD (Eng.), renewable energy,
Yu.M. Nevretdinov, PhD (Eng.), power
engineering,
V.N. Selivanov, PhD (Eng.), power engineering,
A.F. Usov, PhD (Eng.), electrotechnology

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

© Centre of Physical and Technical Problems of Northern Energetics, 2014
© Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences, 2014

CONTENTS

	Page
PHYSICO-TECHNICAL PROBLEMS OF POWER ENGINEERING	
Efimov B.V., Gumerova N.I., Selivanov V.N.	Optimization of transmission line equivalent circuits for computations of lightning overvoltages at the substation entrance..... 5
Kolobov V.V., Barannik M.B.	Operating experience of switching and lightning surges counter for arresters..... 13
Danilin A.N., Ivonin V.V.	High voltage open-air testing area for investigation of sparking in soil under high impulse current on ground..... 26
Danilin A.N., Ivonin V.V.	Probe measurements of processes of pulse currents distribution in moistened soil 31
Burtsev A.V., Nevretdinov Y.M., Smimov A.A.	Laboratory experimental research of power transformer pulse characteristics..... 35
Usov A.F., Potokin A.S.	The pulsed transformation of voltage and energy for electric pulse destruction of materials..... 40
ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY	
Zalesova O.V., Yakubovich M.V.	Induced voltage on deenergized overhead transmission lines caused by AC railway operation..... 50
Kolobov V.V., Barannik M.B., Prokopchuk P.I.	ELF generator for electromagnetic soundings with special power line 62
Kuklin D.V.	Comparison of voltages on upper phase for different groundings in case lightning strikes transmission line with ground wire..... 86
ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY CONSERVATION	
Klyukin A.M., Kuznetsov N.M., Tribunalo S.N.	International cooperation to improve demand-side energy efficiency in the Barents region..... 93
Minin V.A.	Characteristics of heat supply of small settlements of the Murmansk region..... 98

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

УДК 621.311

Б.В.Ефимов, Н.И.Гумерова, В.Н.Селиванов

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В РАСЧЕТАХ РАЗВИТИЯ ГРОВОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ПОДХОДАХ К ПОДСТАНЦИЯМ

Аннотация

Представлены результаты моделирования импульсных процессов на участке линии электропередачи длиной в несколько километров с использованием схем различной степени сложности. Показана допустимость существенного упрощения этих схем при анализе надежности грозозащиты подстанционного оборудования.

Ключевые слова:

линия электропередачи, грозовые волны, подход ВЛ к подстанции.

B.V.Efimov, N.I.Gumerova, V.N.Selivanov

OPTIMIZATION OF TRANSMISSION LINE EQUIVALENT CIRCUITS FOR COMPUTATIONS OF LIGHTNING OVERVOLTAGES AT THE SUBSTATION ENTRANCE

Abstract

The article presents the results of simulation of surge processes on the overhead line several kilometers long when using models of varying difficulty. It is shown that a considerable simplification of equivalent schemes in the analysis of lightning protection reliability of substation equipment can be allowed.

Keywords:

transmission line, lightning surges, substation entrance.

Материал, изложенный далее, является развитием работ по созданию быстродействующего алгоритма расчета деформации фронтов грозовых волн в линиях электропередачи на подходах к подстанциям [1-10]. В основном рассматриваются длины пробега волн не более единиц километров. Алгоритмы, изложенные в этих работах, в принципе позволяют учесть практически все конструктивные особенности высоковольтной линии: геометрию расположения проводов на опорах, провисание проводов и тросов в пролетах, электрические характеристики линейной изоляции, сложные схемы замещения опор и их заземлений и т.д. Однако очевидно, что чрезмерная детализация схем замещения лишь усложняет алгоритмы и увеличивает число исходных данных, часть из которых на практике можно определить весьма приближенно. Для получения конечного результата (числа лет безаварийной работы) при использовании современных методов анализа надежности грозозащиты подстанций [10] необходимо считать сотни вариантов развития перенапряжений в линиях и подстанциях при варьировании амплитуд, длительностей фронтов и мест удара молний. При этом в каждом варианте необходимо выполнять расчет в развернутой схеме замещения «линия (длиной от сотен метров до нескольких километров) – подстанция (с десятками единиц оборудования и участков ошиновки)». Далее используем схему замещения, приведенную на рис.1 [1].

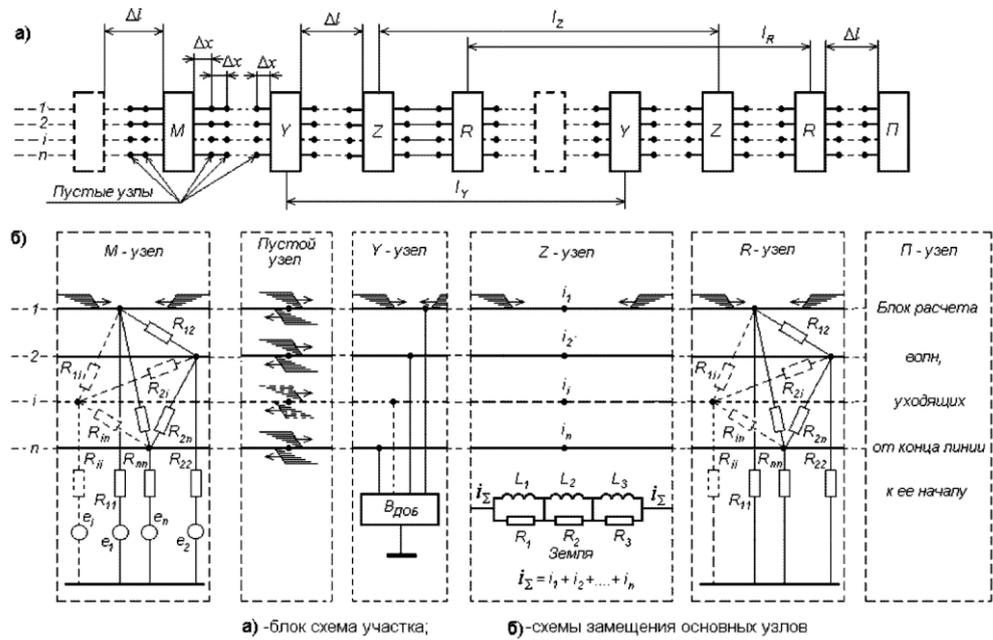


Рис.1. Схема замещения участка многопроводной линии для расчета распространения грозowych импульсов методом бегущих волн

Шаг по времени и длине для наиболее крутых фронтов токов молнии приходится выбирать не более сотых долей микросекунды и единиц метров при общем времени счета до десятков микросекунд. Аналогичная задача возникает в расчетах надежности грозозащиты самих линий с анализом волновых процессов в нескольких пролетах, примыкающих к расчетному месту удара молнии [1]. Все это приводит к необходимости упрощений схем замещения линий при условии сохранения приемлемой точности получаемых результатов.

В схеме рис.1 в каждом пролете линия принимается однородной и считается, что каждый из проводов и грозозащитных тросов подвешен на некоторой средней высоте. В пролетах учитывается изменение поперечных параметров проводов из-за влияния короны и продольных параметров из-за влияния проникновения электромагнитного поля в землю. Расчет ведется методом бегущих волн, в котором влияние обоих искажающих факторов выносятся в Y- и Z-узлы [1]. Считается, что между этими узлами распространение волн по всем проводам и тросам происходит со скоростью света в вакууме ($c=300$ м/мкс) без искажения. Вопрос об оптимальной расстановке Y- и Z-узлов рассмотрен в [5, 8]. В местах установки опор моделируется заземление тросов и вводится возможность учета перекрытия линейной изоляции (R-узел). В [9] подробно рассмотрена активно-индуктивная схема замещения опоры, которая нужна при расчете спада напряжения на проводе после перекрытия гирлянды. Далее будем рассматривать только волны, не вызывающие пробоя линейной изоляции, т.е. несрезанные (полные) волны. В этом случае R-узел в схеме замещения нужен только для моделирования заземлений тросов на опорах. Будем считать, что удар молнии произошел мимо тросовой защиты в фазный провод. Тогда влияние заземлений тросов будет носить характер поправок. При этом не нужно вводить сложные схемы замещения заземлений опор. Достаточно их моделировать постоянным активным сопротивлением проводников на землю. Для совместного учета влияния двух тросов в местах удара молнии и установки опор введем активные сопротивления между проводниками

(помимо сопротивлений проводников на землю). Поскольку нумерация проводников и тросов произвольная, то будем считать, что все проводники связаны между собой и землей активными сопротивлениями. Полагая эти сопротивления или очень малыми или очень большими, можно смоделировать любые варианты одно-, двух- и многоцепных линий с любым числом проводов и тросов.

Обозначим место удара молнии как М-узел (рис.2).

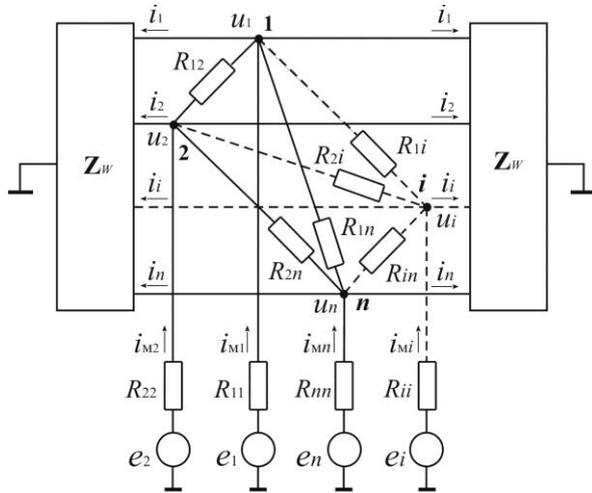


Рис.2. Схема замещения места удара молнии в многопроводную линию

В описанных допущениях он аналогичен R-узлу с тем отличием, что к проводам подключены источники э.д.с., моделирующие импульс главного разряда молнии. На одном из проводов (например первом) это собственно разряд молнии. На параллельных проводах наводки от тока в канале молнии. Для общности записи уравнений в схеме рис.2 введены источники э.д.с. на всех проводах. Для целей оптимизации схем замещения, на которую в основном ориентировано дальнейшее изложение, наличие этих источников не существенно. Поэтому в расчетах будем считать, что наведенные напряжения на всех проводах и тросах (кроме первого) определяются коэффициентами связи между ними (с учетом влияния поверхностного эффекта в земле и короны на проводах).

Будем полагать, что молнию можно эквивалентировать длинной линией с постоянным волновым сопротивлением Z_M , по которой распространяется волна главного разряда. Волна напряжения, эквивалентирующего молнию, равна $e_1(t) = Z_M \cdot 0.5i_M(t)$ и $R_{11} = Z_M$ [10]. Коэффициент 0.5 учитывает удвоение волны реального тока молнии, которое происходит при регистрации токов в хорошо заземленные объекты. При этих допущениях и отсутствии волн, приходящих с линии, имеем простую схему замещения М-узла, представленного на рис.2. Здесь Z_W – матрица волновых сопротивлений линии без потерь.

Определим волны, уходящие от М-узла в линию. Пока считаем, что волны, отраженные от искажающих узлов, отсутствуют.

Имеем для токов в узлах на проводах схемы рис.2:

$$\begin{aligned}
 i_{M1} &= 2i_1 + i_{12} + \dots + i_{1n} \\
 i_{M2} &= i_{21} + 2i_2 + \dots + i_{2n} \\
 &\dots \dots \dots \\
 i_{Mn} &= i_{n1} + i_{n2} + \dots + 2i_n
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Разрешая (1) относительно токов в проводах, получим:

$$\begin{aligned} 2i_1 &= i_{M1} - i_{12} - \dots - i_{1n} \\ 2i_2 &= i_{M2} - i_2 - \dots - i_{2n} \\ &\dots\dots\dots \\ 2i_n &= i_{Mn} - i_{n1} - \dots - i_{n,n-1} \end{aligned} \quad (2)$$

Далее:

$$\begin{aligned} 2i_1 &= \frac{e_1 - u_1}{R_{11}} - \frac{u_1 - u_2}{R_{12}} - \dots - \frac{u_1 - u_n}{R_{1n}} \\ 2i_2 &= \frac{e_2 - u_2}{R_{22}} - \frac{u_2 - u_1}{R_{21}} - \dots - \frac{u_2 - u_n}{R_{2n}} \\ &\dots\dots\dots \\ 2i_n &= \frac{e_n - u_n}{R_{nn}} - \frac{u_n - u_1}{R_{n1}} - \dots - \frac{u_n - u_{n-1}}{R_{n,n-1}} \end{aligned} \quad (3)$$

Раскрывая разности напряжений, получим:

$$\begin{aligned} 2i_1 &= \frac{e_1}{R_{11}} - \left[\left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \dots + \frac{1}{R_{1n}} \right) u_1 - \frac{1}{R_{12}} u_2 - \dots - \frac{1}{R_{1n}} u_n \right] \\ 2i_2 &= \frac{e_2}{R_{22}} - \left[-\frac{1}{R_{21}} u_1 + \left(\frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}} + \dots + \frac{1}{R_{2n}} \right) u_2 - \dots - \frac{1}{R_{2n}} u_n \right] \\ &\dots\dots\dots \\ 2i_n &= \frac{e_n}{R_{nn}} - \left[-\frac{1}{R_{n1}} u_1 - \frac{1}{R_{n2}} u_2 - \dots + \left(\frac{1}{R_{n1}} + \frac{1}{R_{n2}} + \dots + \frac{1}{R_{nn}} \right) u_n \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Введем n -мерные вектора э.д.с., напряжений на проводах и токов в них: \mathbf{e} , \mathbf{U} , \mathbf{I} . Обозначим:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{1i}} & -\frac{1}{R_{12}} & \dots & -\frac{1}{R_{1n}} \\ -\frac{1}{R_{21}} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{2i}} & \dots & -\frac{1}{R_{2n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{1}{R_{n1}} & -\frac{1}{R_{n2}} & \dots & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{ni}} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & R_{nn} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\mathbf{Y}_W = \mathbf{Z}_W^{-1}.$$

Тогда (4) можно записать:

$$2\mathbf{I} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{e} - \mathbf{Y}\mathbf{U}. \quad (6)$$

Напряжения на проводах можно определить также через матрицы волновых сопротивлений и волновых проводимостей:

$$\mathbf{U} = \mathbf{Z}_w \mathbf{I}; \mathbf{I} = \mathbf{Y}_w \mathbf{U}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6), получим:

$$\mathbf{U} = (2\mathbf{Y}_w + \mathbf{Y})^{-1} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{e}. \quad (8)$$

Аналогично вычисляются напряжения в М-узле, созданные волнами, приходящими слева и справа по линии. Эти волны создаются отражениями от искажающих узлов и, возможно, от оконечных устройств. Результирующие напряжения на проводах в месте удара молнии определяются алгебраической суммой трех составляющих: от самой молнии и от волн, набегающих по линии к М-узлу с двух сторон.

Многовариантные расчеты в схеме рис.1 с характерным шагом 1 м по пустым узлам линии и расстановкой Z- и Y-узлов через 10 м позволили сделать ряд выводов о необходимости учета подробностей конструкции линий в расчетах грозозащиты подстанций и для других исследовательских целей.

Были выполнены расчеты волновых процессов в линиях различных конструкций для классов напряжения 110-330 кВ. Влияние параллельных проводов и тросов при напряжении ниже начала короны подробно исследовано авторами настоящей работы в [6]. Аналогичные результаты для коронирующих проводов, расположенных над хорошо проводящим грунтом, даны в [4].

Были выполнены расчеты деформации импульсов с очень крутыми фронтами (десятые доли микросекунды) для линий с треугольным расположением проводов и одним тросом, а также для линий с горизонтальным расположением фазных проводов и двумя тросами. Варьировались высоты расположения проводников, расстояния между ними и эквивалентные радиусы фаз, а также удельное сопротивление грунта. Во всех расчетах получены результаты влияния параллельных проводов и тросов, практически совпадающие с данными, описанными ниже для примера условной пятипроводной линии в габаритах 110 кВ. Были приняты следующие исходные данные: средние высоты подвеса всех трех фаз – 10 м; расстояния между соседними фазами – 4 м; средние высоты подвеса двух тросов – 15 м; расстояние между тросами – 4 м, т.е. тросы сдвинуты относительно вертикальной оси симметрии опоры на 2 м; фазы выполнены одиночными проводами с радиусом 1 см; радиусы тросов 5 мм; удельное сопротивление грунта – 10 кОм·м.

Длина пробега по линии в примере составляла 2000 м, что составляет (с запасом) максимальную длину опасной зоны для линий, подходящих к подстанциям 110 кВ. Амплитуда напряжения волны отрицательной полярности была выбрана близкой к горизонтальному участку вольт-секундной характеристики типичной изоляции линий 110 кВ (6 изоляторов). Напряжение начала короны ~240 кВ.

Опоры расставлены через 150 м. На них заземляются тросы. Фазные провода всегда изолированы по всей длине. Результаты расчетов для хорошо заземленных тросов приведены на рис.3.

Кривая $n=1$ получена при расчете деформации волны в однопроводной линии. Вся энергия распространяется в волновом канале «провод – земля». Скорость распространения волн ниже скорости света в вакууме $c=300$ м/мкс, или $t=3.333$ мкс/км (на рис.3 вычтено запаздывание деформированных волн на 6.666 мкс). Начальная часть фронта волн существенно сглажена из-за потерь в грунте с высоким удельным сопротивлением. Эти же потери сглаживают резкий перелом в районе коронного порога, выше которого деформация определяется суммарным действием короны и потерь в земле.

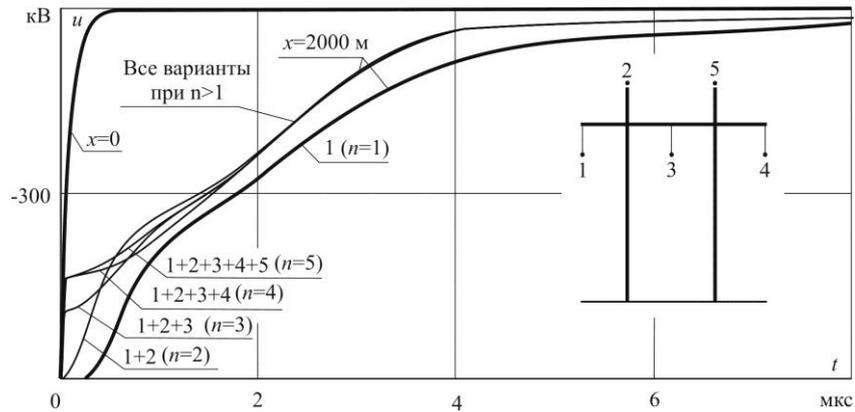


Рис.3. Деформация волн при учете различного числа проводников трехфазной линии с двумя тросами

Кривая $n=2$ получена при расчете деформации волн в двухпроводной линии. Трос заземлен на всех опорах через $R_{гг}=0$ (см. рис.2). Для изолированного троса (второго провода) физика процесса подробно рассмотрена в [3]. Она состоит в разложении на два волновых канала: «все провода – земля» и «провод – провод». При частом заземлении троса физика процесса усложняется, рассматриваемая двухпроводная система приближается к однопроводной, а трос играет роль непрерывно заземленного хорошо проводящего элемента. На трос из земли подтекает заряд полярности, противоположной полярности исходной волны. Этот заряд ослабляет (шунтирует) влияние поля в земле и тем самым уменьшает деформацию. Одновременно этот заряд, расположенный относительно близко от провода, увеличивает напряженность поля у его поверхности и тем самым усиливает действие короны. В целом на рис.3 при учете влияния уже второго провода влияние многопроводности сказывается значительно слабее, чем при отдельном расчете деформации из-за потерь в земле и короны [4, 6]. При сдвиге кривой при $n=1$ на время дополнительного запаздывания по отношению к скорости света c она практически наложится на кривую при $n=2$. Однако увеличение расчетной скорости распространения волн может быть существенным при учете отражений от конца линии, которое в данной работе не рассматривается.

Кривые $n=3, 4, 5$ получены при последовательном включении в расчеты остальных проводов линии в порядке нумерации на схеме рис.3. Видно, что при $n=3$ и $n=4$ начальные участки отличаются от случая $n=2$. Появляются междупроводные каналы с малыми потерями. Начальные участки фронтов волн теперь распространяются практически без потерь [7]. Однако это различие проявляется только при напряжениях ниже 40-50% от амплитудного. Многочисленные расчеты переходных процессов на подстанциях показывают, что эти части волн, набегающих с линий, практически не влияют на амплитуду и длительность перенапряжений на подстанционном оборудовании. Верхняя часть фронтов волн на рис.3 практически сливаются в одну кривую при $n>1$. Влияние второго троса пренебрежимо мало во всем диапазоне напряжений.

Доля каналов с малыми потерями растет по мере снижения амплитуды волны (из-за фиксированности коронного порога при прочих равных условиях). Но такие волны не опасны для подстанций. При повышении амплитуды волны все сказанное выше справедливо с дополнительной необходимостью учета среза волны из-за перекрытия линейной изоляции.

Расчеты рис.3 выполнены с нулевым (малым) сопротивлением заземлений опор, что для удельного сопротивления грунта выше 10 кОм·м не может быть осуществлено на практике. Влияние сопротивлений заземлений тросов дано на рис.4.

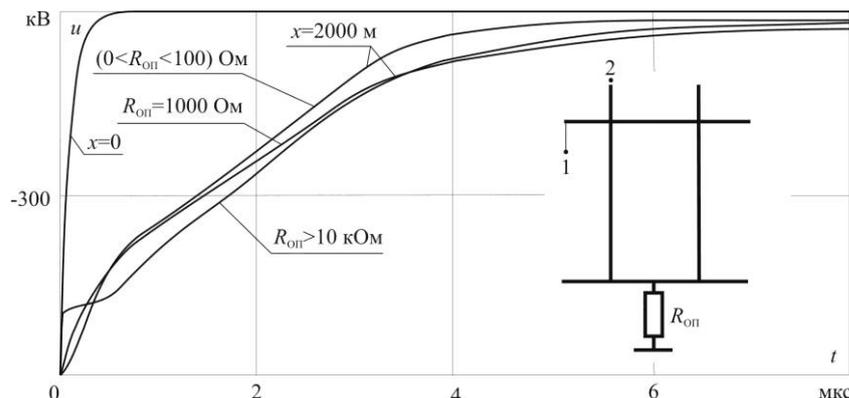


Рис.4. Влияние сопротивления заземления тросов на опорах на деформацию волны на фазном проводе

Верхняя кривая повторяет соответствующую кривую рис.3. Нижняя кривая – это случай изолированного троса по всей линии. При сопротивлениях опор более 100 Ом, но ниже 1 кОм, наиболее реальных для высокого удельного сопротивления грунта, фронты волн находятся между двумя первыми случаями. Несмотря на относительную близость кривых, все же различия заметны. Насколько эти отличия сказываются на конечном результате – надежности грозозащиты оконечной подстанции – нужно исследовать в дальнейшем.

Затраты машинного времени при расчете распространения волны по линии длиной 1500 м приведены в табл. Время распространения волны по линии без потерь – 5 мкс. Графики напряжений рассчитывались до 10 мкс после достижения волнами конца линии. Расчеты выполнялись в среде разработки Visual Fortran с использованием автоматической оптимизации кода на компьютере с процессом Intel с тактовой частотой 3.4 ГГц.

Время работы процессора

Условия счета	Время счета, с			
	2 провода	3 провода	4 провода	5 проводов
Z-узлы – через 30 м; Y-узлы – через 30 м				
Шаг по длине – 3 м; шаг по времени – 10 нс; общее число шагов по линии – 500; число искажающих узлов – 100	0.079	0.125	0.203	0.281
Шаг по длине – 1.5 м; шаг по времени – 5 нс; общее число шагов по линии – 1000; число искажающих узлов – 100	0.172	0.250	0.375	0.546
Шаг по длине – 1 м; шаг по времени – 3.3 нс; общее число шагов по линии – 1500; число искажающих узлов – 100	0.282	0.391	0.625	0.875
Z-узлы – через 10 м; Y-узлы – через 10 м				
Шаг по длине – 1 м; шаг по времени – 3.3 нс; общее число шагов по линии – 1500; число искажающих узлов – 300	1.15	1.46	2.23	3.12

Удовлетворительная точность расчета форм кривых при фронтах тока молнии 0.1-0.2 мкс достигалась уже при шаге по длине 3 м с расстановкой искажающих узлов через 10 пустых. Из табл. видно, что распространение волны на расстояние 1.5 км в двухпроводной линии считается на компьютере менее одной десятой доли секунды, или примерно 750 вариантов в минуту. Такая скорость счета вполне

удовлетворительна для использования алгоритма в многовариантных итерационных расчетах показателей надежности грозозащиты подстанций [10]. Даже увеличение числа проводов до 5 и уменьшение шага по длине до 1 м с расстановкой искажающих узлов через 10 м оставляет скорость счета на приемлемом для исследовательских целей уровне – около 20 вариантов в минуту. Но это, как показано выше, не обязательно. При любых сопротивлениях опор на подходах к подстанциям для массовых расчетов можно рекомендовать двухпроводную схему замещения: «пораженный провод – ближайший трос», которая имеет аналитические решения для уравнений Y- и Z-узлов, малую трудоемкость счета, требует подготовки минимального числа исходных данных, к точности задания которых не предъявляются высоких требований. Использование двухпроводной схемы линии позволяет легко состыковать ее с однолинейной схемой замещения подстанции. Трос в конце линии заземляется на контур подстанции. Пораженный молнией провод нагружается на входное сопротивление ошиновки.

Выводы

Подробный анализ волновых процессов в схемах замещения высоковольтных линий, выполненный [1-10] и развитый в настоящей работе, позволяет сделать следующие выводы.

1. Для расчетов процессов при пробегах волн в десятки километров (регистрация грозовой деятельности, определение мест удара молнии), когда часть волны, превышающая коронный порог, полностью затухает, необходим подробный учет потерь в земле в полной многопроводной постановке задачи с учетом распространения части энергии импульсов в междупроводных каналах.

2. Влияние слоистости грунта существенно при анализе форм волн вплоть до самых крутых фронтов грозовых импульсов в десятые доли микросекунды.

3. При напряжениях, вызывающих коронирование проводов, и хорошо проводящих грунтах влияние параллельных проводов и особенно заземленных грозозащитных тросов заметно воздействует на напряжение начала короны и часть фронта, превышающую это напряжение.

4. При расчете волновых процессов на подходах ВЛ к подстанциям (пробег волн не более 1-2 км) можно отказаться от многопроводной постановки задачи и даже в точных расчетах ограничиться двумя проводниками: пораженным молнией проводом и ближайшим грозозащитным тросом.

Литература

1. Ефимов Б.В. Грозовые волны в воздушных линиях. Апатиты: КНЦ РАН, 2000. 134 с.
2. Гумерова Н.И., Ефимов Б.В. Погонные параметры коронирующей многопроводной линии электропередачи, расположенной над идеально проводящей землей // Моделирование переходных процессов и установившихся режимов высоковольтной сети. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. С. 7-16.
3. Гумерова Н.И., Ефимов Б.В. Анализ влияния короны в двухпроводной линии, подвешенной над идеально проводящей землей // Моделирование переходных процессов и установившихся режимов высоковольтной сети. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. С. 16-38.
4. Гумерова Н.И., Ефимов Б.В. Распространение грозовых волн в многопроводной коронирующей линии, подвешенной над идеально проводящей землей // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2011. Вып. 2 (4). С. 66-78.

5. Ефимов Б.В., Гумерова Н.И. Методические вопросы расчета распространения грозových волн в коронирующей линии электропередачи методом бегущих волн // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2011. Вып. 3 (5). С. 83-98.
6. Гумерова Н.И., Ефимов Б.В. Влияние многослойности грунта на параметры многопроводной линии и деформацию фронтов грозových волн // СПб.: НТВ СПбГПУ. 2009. Т. 4-1, № 89. С. 188-201.
7. Ефимов Б.В., Гумерова Н.И., Стогова Я.А. Анализ деформации грозových волн при их распространении по ВЛ на расстояние более 100 км // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2011. Вып. 2 (4). С. 43-59.
8. Ефимов Б.В., Гумерова Н.И. Моделирование деформации фронтов грозových волн в воздушных линиях вследствие потерь в земле с помощью дискретных неоднородностей // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2011. Вып. 3 (5). С. 99-116.
9. Ефимов Б.В., Гумерова Н.И. Моделирование деформации грозových волн в воздушных линиях с учетом совместного влияния конструкции опор, короны на проводах и потерь в земле // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2013. Вып. 7 (17). С. 13-32.
10. Анализ надежности грозозащиты подстанций / М.В.Костенко, Б.В.Ефимов, И.М.Зархи, Н.И.Гумерова. Л.: Наука. 1981. 127 с.

Сведения об авторах

Ефимов Борис Васильевич,

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

Гумерова Нателла Идрисовна,

доцент кафедры «Электроэнергетика, техника высоких напряжений»
Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, к.т.н., с.н.с.
Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29
тел.: +79112573809
эл. почта: nigumerova@mail.ru

Селиванов Василий Николаевич,

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

УДК 621.311

В.В.Колобов, М.Б.Баранник

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТРОЙСТВА РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ЧЕРЕЗ ОПН ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОММУТАЦИОННЫХ И ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Аннотация

Рассмотрен опыт эксплуатации на трех подстанциях устройства регистрации импульсных токов, протекающих через ОПН под воздействием коммутационных и грозových перенапряжений. Проведен анализ результатов регистрации импульсных токов через ОПН.

Ключевые слова:

опыт эксплуатации, ограничители перенапряжений нелинейные, коммутационные и грозových перенапряжения, импульсные токи, заряд импульса, диагностика, регистратор.

V.V.Kolobov, M.B.Barannik

OPERATING EXPERIENCE OF SWITCHING AND LIGHTNING SURGES COUNTER FOR ARRESTERS

Abstract

The analysis of the first operating experience of switching and lightning surges counter for arresters is presented. Monitoring results of pulse currents in arresters are considered.

Keywords:

operating experience, surge arresters, switching and lightning surges, surge current, electric charge, monitoring, counter.

Как показала практика, ограничители перенапряжений являются одним из самых ненадежных элементов энергосистемы. Причины, приводящие к выходу ОПН из строя, можно разделить на две группы. Первая – системная, связанная с неправильными режимами работы ОПН, например, если на конкретном защитном аппарате при определенных коммутациях возникают феррорезонансные перенапряжения. При этом защитный аппарат, систематически подверженный подобным перенапряжениям, неминуемо выйдет из строя.

Вторая группа – выход ОПН из строя из-за технической неисправности. Самой распространенной неисправностью является пробой ОПН из-за увлажнения внутренних элементов конструкции и изоляции аппарата вследствие разгерметизации корпуса. Менее распространенной неисправностью является критическое увеличение активного тока через нелинейные элементы ОПН вследствие деградиационных процессов, происходящих в оксидно-цинковых элементах [1].

Процесс разгерметизации ОПН с последующим выходом его из строя может происходить за несколько дней, а иногда часов. Поэтому, проводя диагностику защитного аппарата, руководствуясь только рекомендациями предприятий-изготовителей ОПН (измеряя раз в полгода величину тока проводимости), невозможно уверенно выявлять возможные технические неисправности. Кроме того, выпускаемые в настоящее время ОПН не имеют вторичных цепей, позволяющих дистанционно в непрерывном режиме контролировать состояние и работоспособность защитного аппарата и выводить информацию о его возможной неисправности на рабочее место дежурного по подстанции.

В последнее время из-за замены устаревших защитных аппаратов на ограничители перенапряжений нелинейное количество последних в энергосистеме значительно увеличилось, соответственно участились аварии, связанные с выходом ОПН из строя.

Таким образом, разработка устройств, позволяющих проводить диагностику активной составляющей полного тока через ОПН, а также мониторинг импульсов тока, проходящих через ОПН под воздействием грозových, коммутационных и феррорезонансных перенапряжений, является актуальной задачей. Применение таких устройств позволит обеспечить увеличение надежности работы оборудования подстанций и значительно снизить аварийность в энергосистеме из-за отказов ОПН.

Создание устройств диагностики состояния ОПН невозможно без разработки и проведения опытной эксплуатации первичных датчиков активного тока и автономных регистраторов импульсных токов, проходящих через ОПН. В работах [2, 3] были подробно рассмотрены устройство и принцип действия разработанного в ЦФТПЭС КНЦ РАН преобразователя тока проводимости с функцией регистрации импульсов тока, проходящих через ОПН под воздействием грозových и импульсных напряжений. Разработанное устройство может использоваться как первичный датчик тока для контроля спектрального состава, величины активной составляющей тока проводимости ОПН, а встроенный регистратор срабатываний ОПН позволяет фиксировать импульсы разрядного тока через ОПН, вызванные грозowymi или коммутационными перенапряжениями, электрический заряд которых превышает 25 мкКл, измерять заряд

импульсов, вычислять суммарный заряд, прошедший через ОПН за все время эксплуатации, и сохранять эту информацию в памяти с привязкой к дате и времени.

В данной статье рассмотрены результаты опытной эксплуатации преобразователя тока проводимости с функцией регистрации импульсов тока, проходящих через ОПН, на примере нескольких таких устройств, установленных на подстанциях ПС 30, ПС 112 и ПС 203А в начале грозового сезона 2014 г.

Напомним, что регистратор срабатывания ОПН оценивает заряд импульса тока, проходящего через ОПН, численно равный интегралу от функции тока по продолжительности импульса [2]. Регистратор реагирует на импульсы тока с зарядом, превышающим уровень 25 мкКл (такой заряд имеет грозовой импульс тока 8/20 мкс с амплитудой 1.25 А или импульс тока 30/60 мкс с амплитудой 0.45 А). Кроме того, регистратор отдельно выделяет импульсы с зарядом, превышающим уровень 25 мкКл, что соответствует грозовому импульсу тока 8/20 мкс с амплитудой 1250 А или импульсу тока 30/60 мкс с амплитудой 450 А. Информация о количестве и времени прихода импульсов, а также их суммарном заряде сохраняется в цифровом виде в энергонезависимой памяти. Для считывания информации из памяти регистратора (рис.1) используется прибор для диагностики состояния ОПН в процессе эксплуатации «СКАТ-4» [4].



Рис.1. Считывание информации, хранящейся в памяти регистратора срабатываний ОПН, с помощью прибора «СКАТ-4»

В памяти регистратора хранится следующая информация.

1. Идентификационный (серийный) номер счетчика.
2. Суммарная информация по событиям, где под «событием» понимается пакет импульсов тока с зарядом, превышающим величину 25 мкКл, прошедших через ОПН в течение «текущей секунды» [2]:
 - количество зарегистрированных событий за время работы регистратора ПТПР;
 - количество событий, информация о которых находится в памяти регистратора; в зависимости от количества импульсов в событиях сохраняется информация о последних 352-360 событиях;

- количество импульсов тока через ОПН, зарегистрированных ПТПР за все время (с зарядом более 25 мкКл);
 - количество импульсов тока из тех, что зарегистрированы ПТПР за все время, которые имели заряд более 25 мкКл;
 - заряд, прошедший через ОПН, за все время (сумма зарядов зарегистрированных импульсов).
3. Детализированная информация о сохраненных в памяти последних событиях:
- номер события;
 - дата и время;
 - количество импульсов тока в событии (с зарядом более 25 мкКл) и количество импульсов из них, которые имели заряд более 25 мкКл;
 - суммарный заряд импульсов в событии.

На ПС 30 были установлены шесть регистраторов – на ОПН каждой фазы 1-й и 2-й системы шин 150 кВ. На рис.2 приведен фрагмент однолинейной схемы подстанции с отмеченными местами установки регистраторов срабатывания ОПН. Таким образом, установленные устройства позволяли регистрировать импульсные токи, протекающие через ОПН под воздействием грозовых и коммутационных перенапряжений, возникающих на системах шин 150 кВ ПС 30 и линиях Л-153, Л-154. Двухцепная линия Л-153/154 соединяет ПС Выходной и ПС 11А с отпайкой на ПС 30 (рис.3).

Результаты регистрации импульсных токов через ОПН 2-й системы шин 150 кВ ПС-30 приведены в табл.1, а через ОПН 1-й системы шин – в табл.2. Проведем анализ полученных результатов.

Как видно из табл.1, 16 апреля регистратором зафиксированы поочередные срабатывания ОПН каждой из фаз 2-й системы шин. ПС 30 (№ 1-3 в табл.1). Зарегистрированные импульсные токи через ОПН объясняются перенапряжениями на Л-154, возникавшими в ходе исследований, проводимых 16 апреля 2014 г. ЦФТПЭС КНЦ РАН на ПС 11А. Целью исследований являлось получение экспериментальных данных по перенапряжениям на изоляции выключателей ВМТ-150Б на подстанции ПС 11А, возникающих при отключении ненагруженной линии Л-154 под рабочим напряжением. Линия Л-153 находилась в работе. Линия Л-154 была отключена на ПС Выходной линейными разъединителями. Включения и отключения ненагруженной линии Л-154 на ПС 11А выполнялись выключателем ВЛ-154 (2 на рис.3). На ПС-30 Л-154 оставалась подключенной ко 2-й системе шин, что позволило выполнить измерение напряжений на линии, используя трансформаторы напряжений ТН-150-2. Всего в ходе эксперимента было выполнено три цикла включения – выключения линии Л-154. После обработки результатов опытов было установлено, что выключения ненагруженной линии не сопровождались вторичными пробоями в камерах выключателей, а следовательно, не возникало перенапряжений на Л-154. Далее будем рассматривать только опыты включения выключателей, так как именно они приводили к возникновению перенапряжений на линии и, соответственно, на ОПН. По экспериментальным осциллограммам фазных напряжений на 2-й системе шин ПС 30, полученным в ходе эксперимента и имеющим привязку к точному времени, определены времена подачи напряжения в линию. На рис.4 приведена обработанная экспериментальная осциллограмма фазных напряжений на Л-154 после первой коммутации выключателя в 16:58:31. Коммутационный импульс на фазе А имел амплитуду 232.6 кВ (для сравнения: амплитуда импульса на фазе В ~200 кВ), что привело к срабатыванию ОПН фазы А (№ 1 в табл.1).

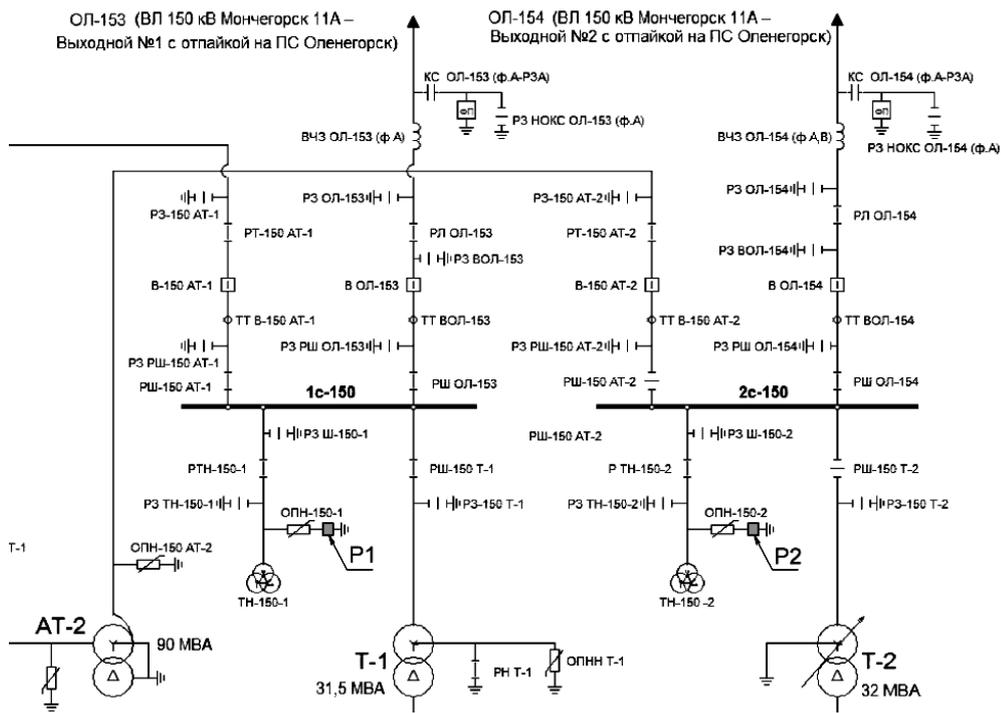


Рис.2. Фрагмент однолинейной схемы подстанции ПС 30 с отмеченными местами установки регистраторов срабатывания ОПН, где P1, 2 – регистраторы срабатывания ОПН фазы А, В, С 1-й (P1) и 2-й системы шин (P2)

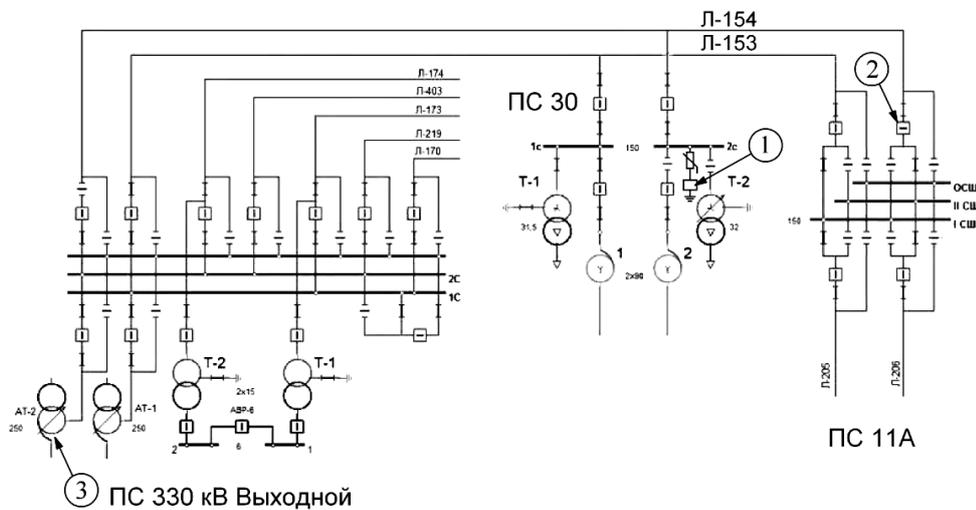


Рис.3. Фрагмент участка сети 150 кВ с двухцепной линией Л-153/154 (схемы ПС Выходной и ПС 11А отображены частично). Цифрами обозначены: 1 – место установки регистраторов срабатывания ОПН; 2 – выключатель линейный Л-154, которым выполнялись коммутации на ПС 11А; 3 – автотрансформатор АТ-2, в нейтрали которого установлен регистратор геоиндуктированных токов

Таблица 1

Результаты регистрации импульсных токов
через ОПН трех фаз 2-й системы шин 150 кВ ПС-30 (линия Л-154)

№	Дата	Время	Общее число импульсов, фаза	Число импульсов >25 мкА	Заряд, прошедший через ОПН, мкА		
					А	В	С
1	16.04.14	16:58:31	1А		0.47	-	-
2	16.04.14	17:08:12	1С		-	-	1.18
3	16.04.14	17:24:37	1В		-	4.25	-
4	06.05.14	06:06:44	2А, 2В, 1С		0	0	0
5	06.05.14	06:12:53	2В		-	0	-
6	06.05.14	15:26:55	2В, 1С		-	0	0
7	28.06.14	00:22:51	79А, 120В, 56С		0	0.95	0
8	01.07.14	17:05:52	22А, 236В, 25С		0	0.47	0
9	08.07.14	16:20:46	25А, 23В	5В	4.73	293.0	-
10	08.07.14	16:21:44	29А, 2В, 10С		133.2	0	37.11
11	09.07.14	14:47:25	2В, 1С		-	0	0
12	28.07.14	17:17:42	1В		-	1.65	-
13	28.07.14	17:20:24	1А		0.47	-	-
14	08.08.14	20:52:53	1А		0.24	-	-
15	21.08.14	10:31:57	22А, 53В		0	0	-
16	22.09.14	06:19:11	2А, 2В, 1С		0	0	0
17	26.09.14	15:16:12	10А, 46В		0	0	-
18	26.09.14	19:35:30	1В		-	0	-
19	26.09.14	19:48:28	1В		-	0	-

Таблица 2

Результаты регистрации импульсных токов
через ОПН трех фаз 1-й системы шин 150 кВ ПС-30 (линия Л-153)

№	Дата	Время	Общее число импульсов, фаза	Число импульсов >25 мкА	Заряд, прошедший через ОПН, мкА		
					А	В	С
1	08.10.13	11:33:23	15А		0	-	-
2	06.05.14	05:52:01	1А, 1В		0	0	-
3	27.06.14	20:29:11-21:28:13 (360 событий)	21С (последнее событие)	15С (последнее событие)	-	-	3606 (последнее событие)

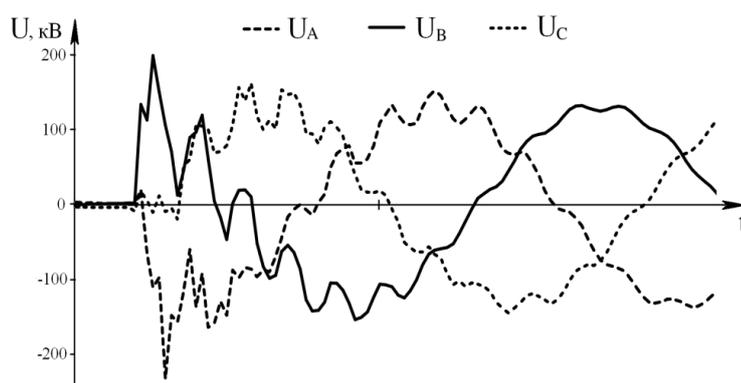


Рис.4. Осциллограммы фазных напряжений на 2-й системе шин 150 кВ ПС 30 после первой коммутации выключателя

На рисунке 5 приведены осциллограммы для второй коммутации в 17:08:12. Максимальную амплитуду 228.3 кВ имел импульс на фазе С, что привело к срабатыванию ОПН фазы С (№ 2 в табл.1). На аналогичной осциллограмме для третьего включения выключателя в 17:24:37 (рис.6) амплитуда импульса напряжения на фазе В имела наибольшую величину – 239 кВ, соответственно, сработал ОПН этой фазы (№ 3 в табл.1). Основываясь на показаниях регистратора и вышеописанных исследованиях, можно экспериментально оценить уровень импульсного напряжения, приводящего к срабатыванию ОПН класса напряжения 150 кВ, установленных на 2-й системе шин ПС 30 (~230 кВ).

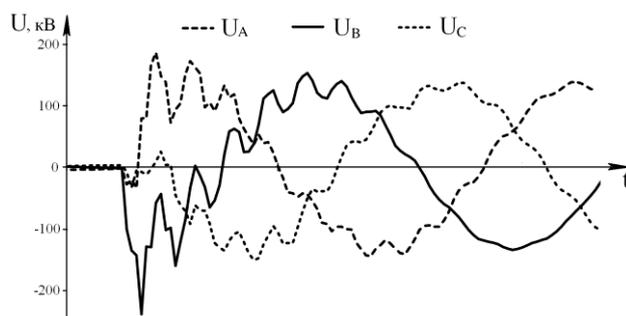


Рис.5. Осциллограммы фазных напряжений на 2-й системе шин 150 кВ ПС 30 после второй коммутации выключателя

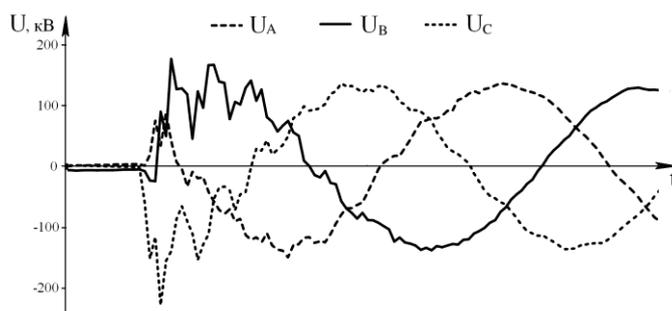


Рис.6. Осциллограммы фазных напряжений на 2-й системе шин 150 кВ ПС 30 после третьей коммутации выключателя

Кроме того, в ходе создания системы регистрации (мониторинга) воздействия магнитосферных возмущений на энергосистему Карелии и Кольского полуострова на ряде подстанций были установлены регистраторы геоиндуцированных токов (ГИТ) в нейтральных автотрансформаторов [5]. Такой регистратор был установлен в нейтрали АТ-2 330/150кВ ПС Выходной. Особенностью регистратора является то, что, кроме постоянной записи в цифровом виде непосредственно квазипостоянных ГИТ с частотой дискретизации 10 Гц, он имеет режим записи импульсов тока, возникающих в нейтрали АТ при переходных процессах от грозовых и коммутационных перенапряжений. Регистратор переходит в такой режим при превышении величиной dl/dt некоторого порога. При этом ток через нейтраль оцифровывается с гораздо большей частотой дискретизации – 14.4 кГц. Длительность выборки кривой тока с предысторией составляет приблизительно 18 мс. Запись сохраняется в памяти регистратора, а затем передается по каналу связи на сервер для дальнейшего анализа [6]. На рис.7 приведены осциллограммы переходных процессов в нейтрали АТ-2 ПС Выходной 16 апреля 2014 г.

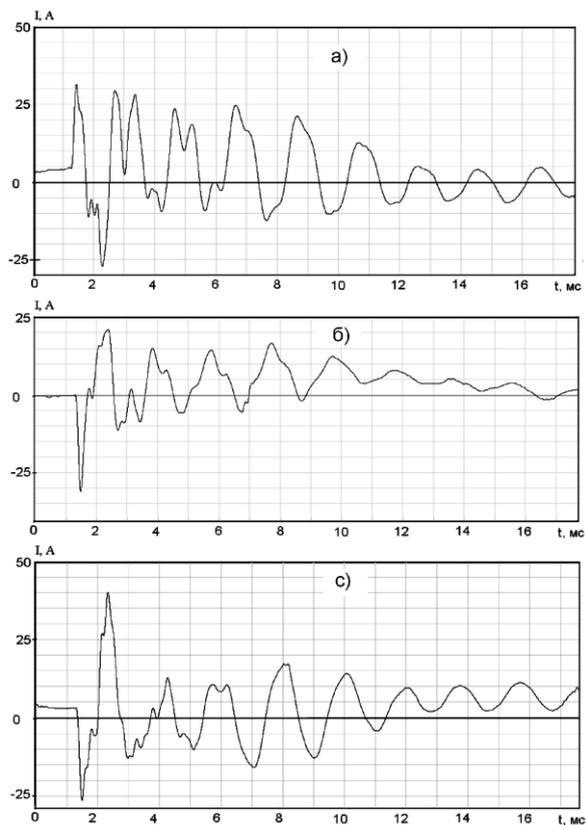


Рис.7. Осциллограммы тока в нейтрали АТ-2 ПС Выходной, записанные регистратором ГИТ 16 апреля 2014 г. в 16:58:31 (а), 17:08:12 (б) и 17:24:37 (с)

Записи сделаны регистратором ГИТ в 16:58:31 (а), 17:08:12 (б) и 17:24:37 (с), т.е. в моменты коммутации выключателей на ПС 11А. Причем, как отмечалось выше, линия Л-154 была отключена на ПС Выходной линейными разъединителями, соответственно записанные осциллограммы представляют собой токи в нулевой последовательности Л-153, наведенные коммутационными процессами в Л-154 за счет индуктивно-емкостной связи между линиями (линия Л-153/154 является двухцепной).

Импульсы тока через ОПН, зафиксированные регистратором в период с 06.05.14 по 09.07.14 (№ 4-11 в табл.1), не идентифицированы по причине возникновения и, вероятнее всего, были вызваны коммутационными перенапряжениями на 2-й системе шин ПС 30.

28 июля зафиксированы импульсы тока через ОПН фаз В и А с зарядом 1.65 и 0.47 мКл соответственно (№ 12-13 в табл.1). Причина этих срабатываний ОПН установлена. В этот день наблюдалась грозовая активность, соответственно регистратор зафиксировал импульсные токи через ОПН от грозовых перенапряжений на линии Л-154. Это подтверждают и данные, полученные от регистратора ГИТ, установленного на ПС Выходной (рис.8), который зафиксировал импульсные токи в нейтрали АТ-2 в 17:17:42 (а) и 17:20:24 (б). Амплитуда тока была так велика, что превысила входной диапазон регистратора ГИТ, поэтому сигналы на рис.8 ограничены по амплитуде. Форма сигнала тока – период промышленной частоты – свидетельствует о том, что на линии вследствие удара молнии произошло перекрытие изоляции на землю, приведшее к короткому замыканию с последующим отключением линии. Факты отключения линии в указанное время подтверждаются диспетчерской документацией.

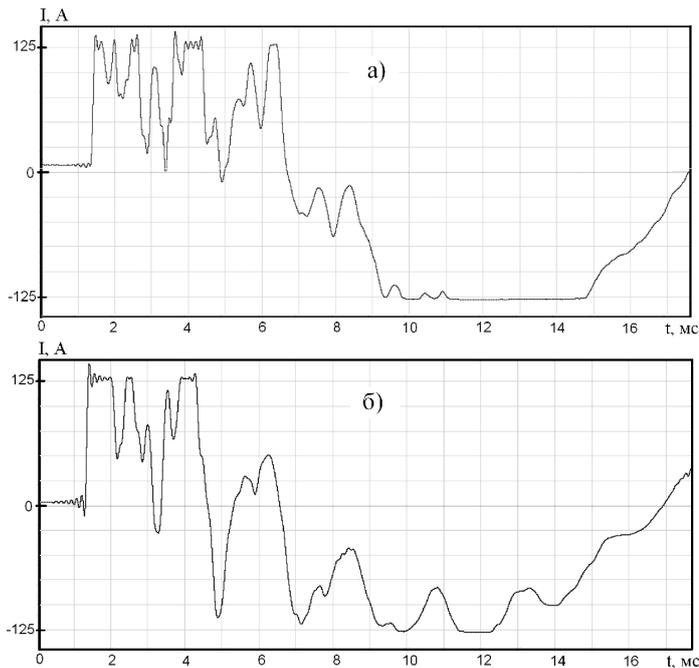


Рис.8. Токи в нейтрали АТ-2, вызванные попаданием молнии в линию Л-154 28 августа 2014 г. в 17:17 (а) и 17:20 (б)

Грозовым перенапряжением на Л-154 объясняется и срабатывание ОПН фазы А 8 августа в 20:52:53 (№ 14 в табл.1). Регистратор ГИТ на ПС Выходной в этот момент времени также зарегистрировал импульс тока в нейтрали АТ-2 (рис.9). Ток на рисунке не является следствием короткого замыкания, что подтверждается диспетчерской документацией, в которой отключение линии не зафиксировано.

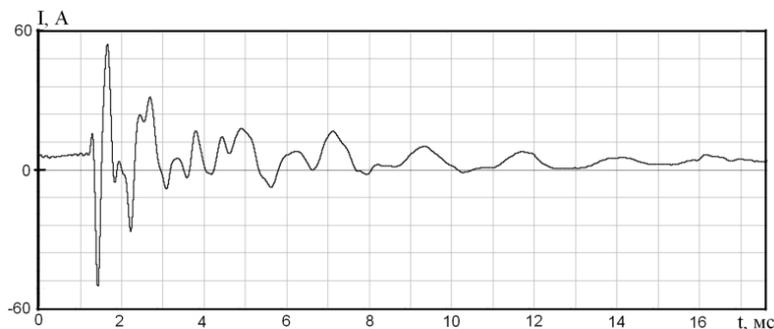


Рис.9. Осциллограмма тока в нейтрали АТ-2, записанная регистратором ГИТ 8 августа в 20:52:53

Результаты регистрации импульсных токов через ОПН 1-й системы шин ПС 30 (линия Л-153), как уже отмечалось, приведены в табл.2. Причины возникновения импульсов тока № 1 и 2 не определены. Вероятнее всего, срабатывания ОПН были вызваны коммутационными перенапряжениями на 1-й системе шин.

27 июня 2014 г. зафиксированы многократные срабатывания ОПН фазы С. Эти импульсы тока объясняются процессом выхода из строя с разрушением конструкции ОПН фазы С. Как выяснилось впоследствии, причиной аварии ОПН послужило попадание влаги на внутреннюю поверхность оболочки ОПН вследствие разгерметизации конструкции (в течение всего дня 27 июня в Оленегорске наблюдались осадки в виде дождя). Регистратор зафиксировал в период с 20 ч 29 мин 11 с по 21 ч 28 мин 13 с 360 событий, позволяющих «наблюдать» процесс выхода ОПН из строя. В течение всего указанного периода времени через ОПН протекали импульсные токи, вызванные не приводящими к короткому замыканию пробоями по увлажненной внутренней поверхности оболочки ОПН. В течение одного события (секунды) количество импульсов составляло от 1 до 7, а их суммарный заряд достигал 0.47 мКл. Величина заряда импульсов имела случайное распределение по времени и не увеличивалась. Интервал между событиями составлял от единиц до нескольких десятков секунд. Большие интервалы могут объясняться тем, что образовавшийся проводящий канал на внутренней поверхности оболочки ОПН успевал подсыхать за время серии незавершившихся разрядов. Эти события из-за большого количества в табл.2 не приведены. На последней минуте (21:28) частота следования событий увеличилась – пробой происходил практически каждую секунду. За последнюю секунду (21:28:13) зафиксирован 21 импульс, 15 из которых имели заряд более 25 мКл. Суммарный заряд последнего события составил более 3.6 Кл (№ 3 в табл.2). Далее произошло разрушение ОПН.

После аварии защитный аппарат фазы С был заменен, а на ОПН остальных фаз преобразователи тока проводимости с функцией регистрации импульсов тока были сняты и установлены стандартные датчики токов утечки.

Один комплект из трех регистраторов срабатывания ОПН был установлен на ОПН 150 кВ линии ОЛ-156 (отпайка Л-156) подстанции ПС 112. Фрагмент однолинейной схемы ПС 112 с отмеченным местом установки регистраторов приведен на рис.10.

Результаты регистрации токов через ОПН на ПС 112 приведены в табл.3. В колонке «Заряд» нулем обозначены те случаи срабатывания ОПН, зафиксированные регистратором, для которых энергия импульса тока была меньше минимально измеряемой устройством величины.

Проанализируем результаты регистрации. Сразу отметим, что все срабатывания ОПН идентифицированы по причине возникновения и связаны с грозовыми перенапряжениями. При анализе результатов регистрации использовалась информация об отключениях линий, предоставленная диспетчерской службой (приведена в столбце «Комментарий» табл.3). Большое количество событий 7 июня 2014 г. обусловлено сильной грозой в этот день. В 18:19 зарегистрировано попадание молнии в линию Л-155 с перекрытием изоляции и отключением линии с последующим успешным АПВ. При этом наведенное напряжение на Л-156 привело к срабатыванию ОПН фазы В, но импульс тока имел малый заряд (№ 1 в табл.3). В 18:47 и 18:52 регистратор импульсов срабатывал из-за грозового перенапряжения на фазах В и С соответственно (№ 2, 4 в табл.3). По величине заряда импульсов можно заключить, что попадание молнии произошло в линию Л-156. В 18:51 сработал ОПН фазы В (№ 3 в табл.3), что вызвано попаданием молнии в провод этой фазы линии Л-156. При этом произошло перекрытие изоляции и отключение линии с успешным АПВ.

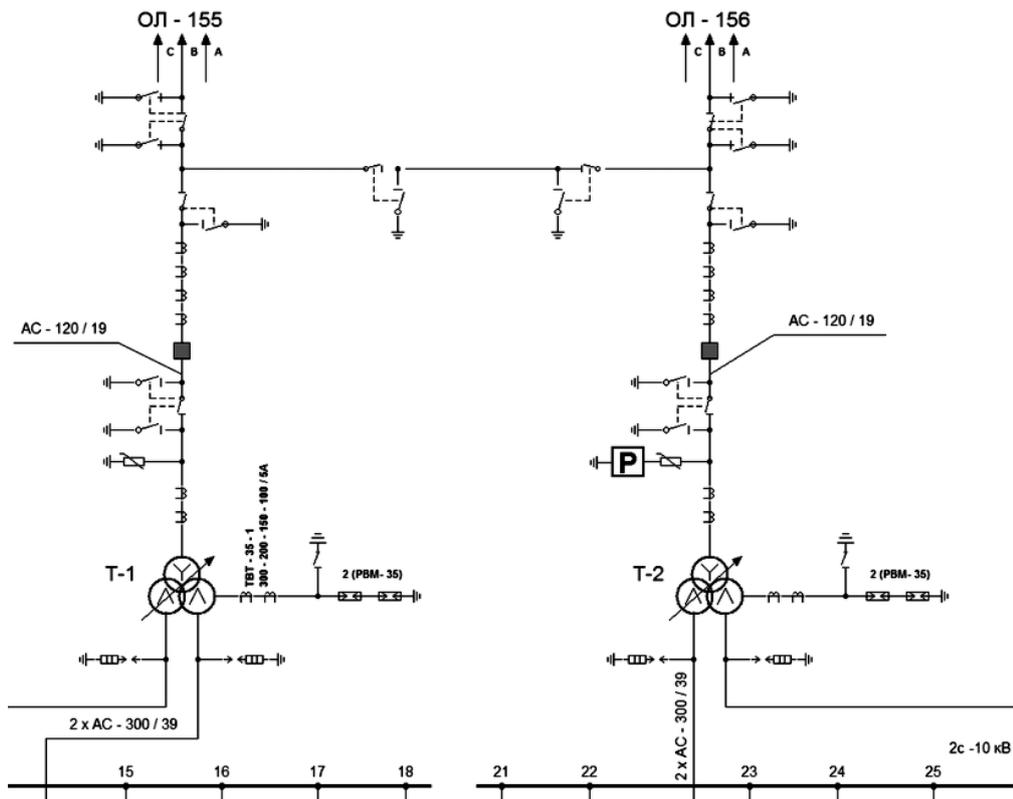


Рис.10. Фрагмент схемы ПС 112 с отмеченным местом установки трех регистраторов срабатывания ОПН (P)

Таблица 3

Результаты регистрации импульсных токов через ОПН линии ОЛ-156 ПС 112

№	Дата	Время	Заряд, прошедший через ОПН, мКл			Комментарий
			фаза А	фаза В	фаза С	
1	07.06.14	18:19	-	0	-	Откл. Л-155, АПВ – успешный
2	07.06.14	18:47	-	9.22	0	-
3	07.06.14	18:51	-	2.13	-	Откл. Л-155, АПВ – успешный
4	07.06.14	18:52	0	0	0.24	-
5	07.06.14	19:02	0	-	-	-
6	07.06.14	19:14	-	-	0	-
7	31.07.14	21:52	1.89	0.71	0.24	-
8	14.08.14	18:34	0	1.89	-	Откл. Л-155, 156 АПВ – успешный
9	15.08.14	18:03	5.91	6.85	38.76	-

31.07.14 в 21:52 регистратор зафиксировал токи от грозового перенапряжения на линии, причем, судя по измеренной величине заряда импульса тока, попадание молнии произошло в провод фазы А, а ОПН других фаз сработали от наведенных напряжений (№ 7 в табл.3). Грозовое перенапряжение на линии не вызвало перекрытия изоляции и отключения линии.

14.08.14 зафиксировано срабатывание ОПН фазы А и В от грозового перенапряжения. Это событие сопровождалось отключением обеих линий Л-155, 156 с последующим успешным АПВ (№ 8 в табл.3).

15.08.14 в 18:34 зарегистрированы импульсные токи через ОПН всех фаз со значительным зарядом (№ 9 в табл.3). Максимальный заряд – 38.76 мКл – прошел через ОПН фазы С, что свидетельствует о попадании молнии в провод этой фазы. ОПН остальных фаз сработали от наведенных напряжений. Грозовое перенапряжение на линии не привело к перекрытию изоляции и отключению линии.

Комплект из трех регистраторов срабатывания ОПН был также установлен на ОПН 150 кВ линии ОЛ-114 (отпайка Л-114) подстанции ПС 203А. Фрагмент однолинейной схемы ПС 203А с отмеченным местом установки регистраторов приведен на рис.11, а результаты регистрации токов – в табл.4. Все срабатывания регистратора на ПС 203А также объясняются грозовой активностью.

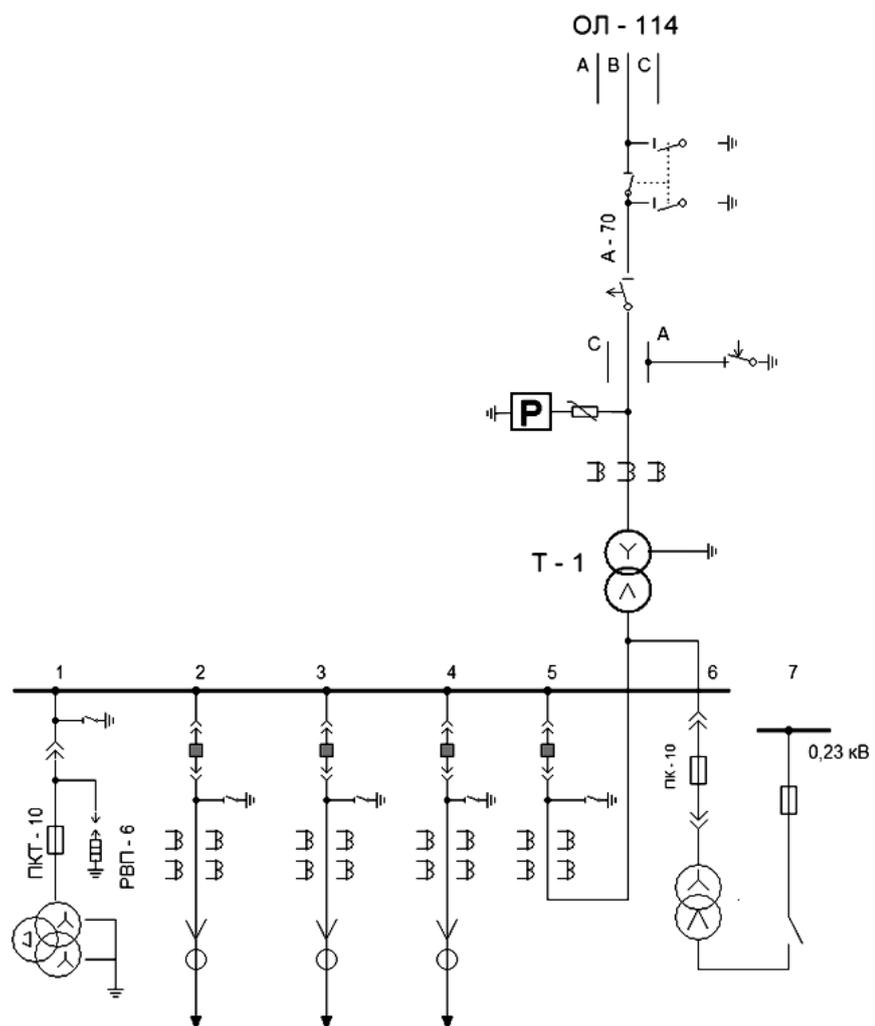


Рис.11. Фрагмент схемы ПС 203А с отмеченным местом установки трех регистраторов срабатывания ОПН (P)

Во время сильной грозы 7 июня в 19:00 зарегистрировано срабатывание ОПН фазы С ПС 203А со значительным зарядом импульса тока – 133.7 мКл (№ 3 в табл.3). Это вызвано грозовым перенапряжением от попадания молнии в провод этой фазы линии Л-114. При этом произошло перекрытие изоляции и отключение линии с последующим успешным АПВ (№ 1 в табл.4). Аналогичное явление зафиксировано в 21:52 во время грозы 31.07.14 (№ 2 в табл.4), при этом, исходя из показаний регистратора, удар молнии пришелся в провод фазы В линии Л-114.

Таблица 4

Результаты регистрации импульсных токов через ОПН линии ОЛ-114 ПС 203А

№	Дата	Время	Заряд, прошедший через ОПН, мКл			Комментарий
			фаза А	фаза В	фаза С	
1	07.06.14	19:00	-	-	133.7	Откл. Л-114, АПВ – успешный
2	31.07.14	21:50	0	2.6	-	То же

Сравнивая данные регистраторов, установленных на трех подстанциях, можно сделать заключение, что защищаемое ОПН оборудование ПС 30 подвержено как коммутационным, так и грозовым перенапряжениям, а причиной срабатывания ОПН подстанций ПС 112А и ПС 203А являются только грозовые перенапряжения.

Таким образом, опытную эксплуатацию преобразователя тока проводимости с функцией регистрации импульсов тока, проходящих через ОПН под воздействием грозовых и импульсных напряжений, можно считать успешной. Анализируя опыт эксплуатации в течение грозового сезона 2014 г. двенадцати таких регистраторов, установленных на трех подстанциях, можно заключить, что разработанное устройство регистрирует импульсные токи через ОПН, вызванные как коммутационными, так и грозовыми перенапряжениями. Информация о срабатывании ОПН, полученная с помощью устройства, позволяет убедиться в функционировании защитного аппарата и получить данные относительно интенсивности перенапряжений на соответствующем участке сети, защищаемом ОПН, помочь диагностировать причины возникновения перенапряжений, в том числе критических, приводящих к выходу защитного аппарата из строя. Анализируя данные регистратора, можно восстановить процесс развития аварии в защитном аппарате. По нашему мнению, является целесообразным оснащение ОПН такими регистраторами, особенно тех, которые подвержены частым авариям. Данные регистратора позволяют оценить реальный оставшийся ресурс защитного аппарата по пропускной способности, вовремя принять решение о выводе ОПН из эксплуатации или продлении его срока службы и тем самым обеспечить увеличение надежности работы оборудования подстанции. Разработанный регистратор может служить одним из элементов для создания системы непрерывной диагностики и дистанционного мониторинга состояния ОПН в процессе эксплуатации.

Литература

1. Особенности контроля состояния ограничителей перенапряжений нелинейных на местах их эксплуатации / М.Б.Баранник, В.Ю.Барбарович, В.Л.Дмитриев, В.В.Колобов // Электротехнический рынок. 2013. № 1 (49). С. 82-85.
2. Баранник М.Б., Колобов В.В., Прокопчук П.И. Разработка устройства регистрации импульсных токов, протекающих через ОПН под воздействием коммутационных и грозовых перенапряжений в процессе эксплуатации // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2013. Вып.6. С. 86-96.
3. Баранник М.Б., Евстигнеев А.В., Колобов В.В. Аспекты функциональной достаточности и электромагнитной совместимости устройств для регистрации срабатывания ОПН // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2013. Вып.7. С. 101-107.

4. Опыт калибровки и практической эксплуатации прибора для диагностики состояния ОПН типа СКАТ-3 / М.Б.Баранник, В.Ю.Барбарович, В.Л.Дмитриев, В.В.Колобов // Приборы. 2011. № 11 (137). С. 40-45.
5. Система регистрации геоиндуктированных токов в нейтральных силовых автотрансформаторов / М.Б.Баранник, А.Н.Данилин, Ю.В.Катькалов, В.В.Колобов, Я.А.Сахаров, В.Н.Селиванов // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 1. С. 118-123.
6. Исследование влияния геомагнитных возмущений на гармонический состав токов в нейтральных автотрансформаторов / В.Н.Селиванов, М.Б.Баранник, А.Н.Данилин, В.В.Колобов, Я.А.Сахаров // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2012. Вып.4. С. 60-68.

Сведения об авторах

Колобов Виталий Валентинович,

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

Баранник Максим Борисович,

ведущий инженер лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
эл. почта: maxbar@ien.kolasc.net.ru

УДК 621.311

А.Н.Данилин, В.В.Ивонин

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ПОЛИГОН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИСКРООБРАЗОВАНИЯ В ГРУНТАХ ПРИ СТЕКАНИИ БОЛЬШИХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ С ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

Аннотация

Описаны высоковольтный полигон для исследования процессов искрообразования в грунтах, а также оборудование, созданное для формирования и измерения высоковольтных импульсов напряжения.

Ключевые слова:

искрообразования в грунте, генератор импульсных напряжений, генератор Аркадьева – Маркса, омический делитель напряжения.

A.N.Danilin, V.V.Ivonin

HIGH VOLTAGE OPEN-AIR TESTING AREA FOR INVESTIGATION OF SPARKING IN SOIL UNDER HIGH IMPULSE CURRENT ON GROUND

Abstract

High-voltage polygon for investigation of sparking in soil and equipment designed for generating and measuring high-voltage pulses are described.

Keywords:

sparking in soil, Marx generator, resistive voltage divider.

Проблема защиты от ударов молнии зданий и сооружений различного назначения разрабатывается на протяжении многих десятилетий, однако до сих пор в проблеме выбора оптимальной конструкции заземлителей остаются нерешенные вопросы. Достоверность расчета и выбора схем молниезащиты должна быть обоснована результатами экспериментальных исследований при процессах, подобных разряду молнии. Расчет сопротивлений заземлителей сложен из-за наличия искрообразования

в грунте при больших токах молниевых разрядов и в связи с этим нелинейной характеристикой сопротивления. Эти сложные и важные для практики молниезащиты явления нуждаются в экспериментальном исследовании и моделировании. Соответствующие испытания должны производиться до ввода в эксплуатацию каждого ответственного технического объекта [1].

Районы крайнего Севера, включая Кольский полуостров, регион с высокоразвитой промышленностью, в отношении грозозащиты объектов электроэнергетики характеризуются низкой интенсивностью гроз и высоким удельным сопротивлением грунта. Нормативные документы (ПУЭ, методические указания, нормативные акты и др.) в отношении значений сопротивлений защитных заземляющих устройств дают величины, достижение которых требует огромных затрат, а зачастую технически нереализуемо.

При высоких удельных сопротивлениях грунта протекание грозных токов в земле создает огромные напряженности электрического поля вокруг заземляющего проводника, вызывающие интенсивную ионизацию в окружающем грунте и искрообразование в нем.

В связи с этим в последнее время ряд исследований, в том числе зарубежных, направлено на изучение влияния процессов ионизации и искрообразования в грунтах разных типов. Крупные отечественные исследования в этой области производились в 1970-х гг. В настоящее время (1990-2005 гг.) в России проводились исследования растекания токов с заземлителей, имеющие феноменологический характер, с привязкой к конкретным устройствам заземления. Полученные результаты согласовывались с зарубежными, однако отсутствовала привязка к региональным особенностям грунтов, а также, как у нас, так и за рубежом, полученные сведения о протекающих процессах не находили применения в отношении использования данных для оптимизации заземляющих устройств и их влияния на защитные функции заземляющих устройств.

Накопленный опыт по постановке лабораторных исследований и разработанные системы измерений позволили получить большой объем предварительных результатов. Эти же исследования показали необходимость переноса опытов в открытые объемы грунтов, поскольку было показано большое значение в достоверных результатах краевых эффектов, искажающих реальные процессы стекания больших импульсных токов с заземлителей. В связи с этим был разработан высоковольтный полигон с генераторно-измерительной аппаратурой.

Описание высоковольтного полигона. Полигон представляет собой участок земли площадью 8×16 м вблизи здания высоковольтной лаборатории. По контуру участка на глубине примерно 250 мм проложен замкнутый заземляющий контур, выполненный стальной полосой 35 мм. Для снижения сопротивления заземляющего контура через каждые 2 м по контуру заземления в землю забиты электроды диаметром 20 мм и длиной 400 мм, которые приварены к полосе контура. Конструкция полигона приведена на рис. 1.

Грунт полигона двухслойный: сверху – морена глубиной до 0.5 м (смесь песка с галькой), ниже – дробленые скальные грунты. В центре полигона для удобства размещения в грунте электродов по длине вырыта канава глубиной 0.4 м и шириной 0.4 м, которая заполнена песком.

В качестве нагрузки, представляющей собой заземлители различной конфигурации, могут быть использованы как сосредоточенные электроды (например полусфера или вертикальный стержень), так и протяженные горизонтальные длиной до 6 м. Исследуемые заземлители могут быть размещены в песчаной канаве на глубинах от 0 до 300 мм.

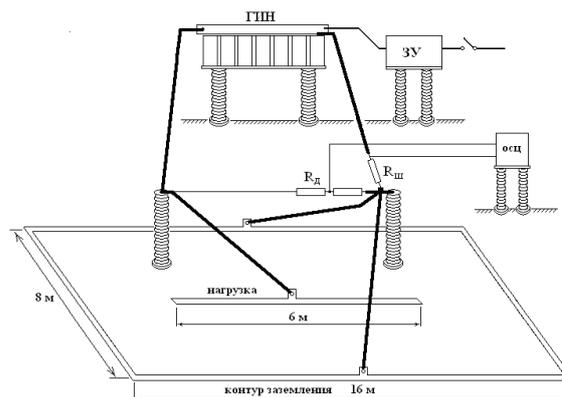


Рис.1. Устройство высоковольтного полигона

Конструкция ГИН. Для выполнения исследований на полигоне был создан генератор импульсных напряжений, выполненный по схеме Аркадьева – Маркса [2]. Принципиальная схема ГИН представлена на рис.2.

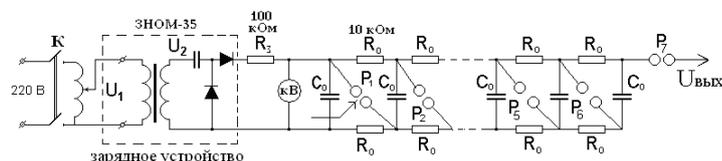


Рис.2. Принципиальная схема ГИН

Как видно из схемы, конденсаторы ступеней C_0 заряжаются от выпрямительного устройства, выполненного по схеме удвоения напряжения. Выпрямитель питается от трансформатора ЗНОМ-35, R_3 – защитный резистор. Значение максимального выпрямленного напряжения регулируется в пределах от 1 до 70 кВ.

Генератор импульсных напряжений выполнен на основе импульсных конденсаторов ИК-100/0.4 и состоит из 7 ступеней. Таким образом, максимальное импульсное напряжение на выходе ГИН составляет примерно 450 кВ и хорошо регулируется от 150 кВ. Для получения меньших напряжений (10-150 кВ) уменьшается число ступеней ГИН. На рис.3 приведена фотография генератора.

Коммутация ГИН принудительная. После заряда ГИН от зарядного устройства последнее отключается от сети 220 В коммутатором К и производится механическая коммутация первого разрядника ГИН. Этим обеспечена развязка сети от источника импульсных напряжений. Контроль над величиной заряда конденсаторов осуществляется по киловольтметру.

Для измерения импульсных напряжений на выходе ГИН и на нагрузках использовался омический делитель напряжения. Высоковольтное плечо делителя было выполнено на основе семи последовательно соединенных резисторов 30 кОм. Измеренное общее активное сопротивление высоковольтного плеча делителя составило $R_d=221.5$ кОм. Компенсация искажений импульсных напряжений выполнена при помощи импульсных конденсаторов, включенных параллельно резисторам высоковольтного плеча делителя. Низковольтное плечо делителя имеет сопротивление 50 Ом, которое соответствует волновому сопротивлению коаксиального кабеля между делителем и осциллографом. С учетом согласованного подключения делителя к цифровому осциллографу его градуировочный коэффициент равен примерно $K_d=56000$. Для проведения исследований по распределению потенциалов в грунте вокруг электродов были созданы два одинаковых делителя напряжения.

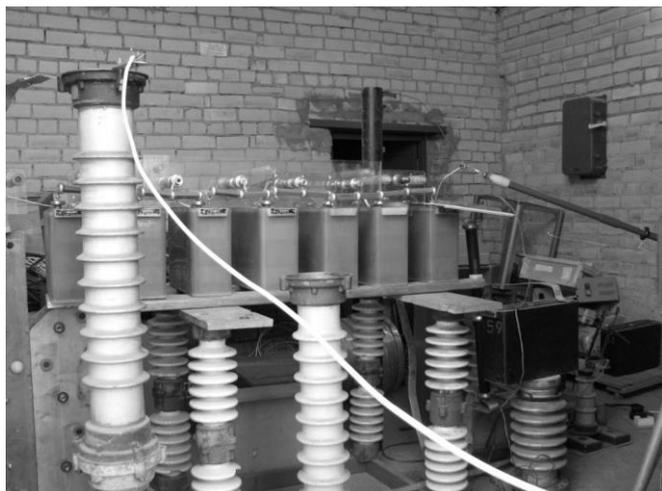


Рис.3. Генератор импульсных напряжений

Токи, протекающие через грунт, регистрировались с помощью мостового шунта, выполненного по схеме Пашена [3]. Сопротивление шунта 0.39 Ом. Градуировочный коэффициент шунта $R_{Ш}=0.016$.

Данные с делителей напряжения и токового шунта поступали на цифровой осциллограф АКИП-4113/2. На рис.4 приведена схема подключения токового шунта и делителя напряжения через согласующие элементы и промежуточные делители.

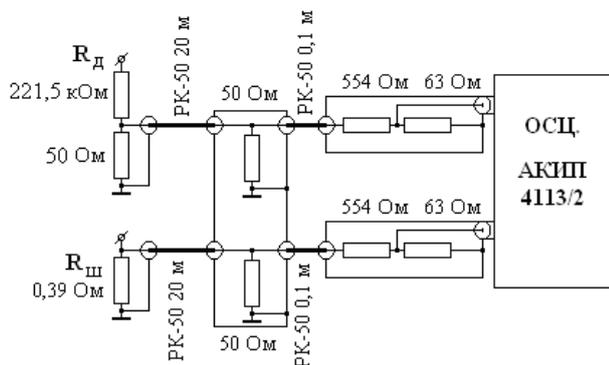


Рис.4. Измерительная схема

Проверка генераторно-измерительной установки на полигоне. Для проверки установки использовался заземлитель в виде сферического электрода диаметром 140 мм, который был погружен в грунт на величину радиуса. Амплитуда напряжения, подаваемого на электрод, составляла 150 кВ. На рис.5 представлены осциллограммы напряжения, тока и расчетного сопротивления.

Длительность фронта полученных импульсов составила менее 1 мкс, а длительность напряжения на полуспаде равнялась 32-37 мкс. Расчет сопротивления показал, что во время разряда за счет искрообразования в грунте сопротивление заземлителя снижалось более чем в 2 раза.

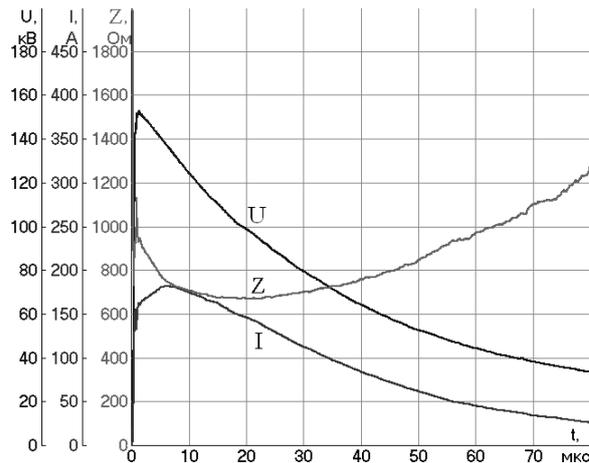


Рис.5. Осциллограммы напряжения, тока и расчетного сопротивления

Выводы

1. Создан полигон, позволяющий проводить исследования импульсных процессов на заземляющих устройствах в открытых грунтах, где не сказываются краевые эффекты.
2. Проведены успешные испытания генератора импульсных напряжений и зарегистрированы импульсы напряжения на заземлителе и тока в открытом грунте. Показана возможность создания мобильных генераторов, имитирующих разряды молнии, выполненных на основе генератора Аркадьева – Маркса с напряжением до 1 МВ.

Литература

1. Мобильная установка на основе генератора импульсного напряжения для исследования влияния токового импульса молнии на сопротивление грунта / В.Е.Фортов, В.П.Смирнов, Э.Я.Сон и др. // Сборник докладов IV международной конференции по молниезащите (Санкт-Петербург, 27-29 мая 2014 г.). СПб., 2014. С. 231-239.
2. Техника высоких напряжений / под ред. М.В.Костенко. М.: Высш. шк., 1973. 528 с.
3. Данилин А.Н. Разработка высоковольтных систем генерирования и регистрации импульсов, моделирующих атмосферные перенапряжения в подземных проводниках: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1990. 231 с.

Сведения об авторах

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

Ивонин Виктор Владимирович,
 аспирант Кольского научного центра РАН
 Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
 эл. почта: ivoninviktor@mail.ru

УДК 621.311

А.Н.Данилин, В.В.Ивонин

ЗОНДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОЦЕССОВ РАСТЕКАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ В УВЛАЖНЕННОМ ГРУНТЕ*

Аннотация

Приведены результаты исследований распределения потенциалов вокруг заглубленных в грунт электродов при импульсных воздействиях на них. Помимо этого приведены данные, полученные в ходе изучения скорости роста искровых каналов в грунте.

Ключевые слова:

искрообразования в грунте, распределение потенциалов, скорость роста искровых каналов.

A.N.Danilin, V.V.Ivonin

PROBE MEASUREMENTS OF PROCESSES OF PULSE CURRENTS DISTRIBUTION IN MOISTENED SOIL

Abstract

The results of potential distribution research around buried electrodes as well as the data obtained during the study of the sparking rate in soil are presented.

Keywords:

sparking in soil, potential distribution, sparking rate.

Исследования распределения потенциалов вокруг заглубленных в грунт электродов имели целью получить сравнительные зависимости распределений для резко отличающихся электродов: сферического и вертикального стержневого [1-3]. Проверялась гипотеза о том, что при напряженностях в грунте, превышающих порог искрообразования, зависимости распределения потенциалов даже у резко отличающихся систем будут близки по форме и количественным показателям.

Для выполнения исследований распределения потенциала в грунте была разработана зондовая система измерений, которая должна отвечать следующим требованиям.

1. Зонд, помещаемый вблизи электрода и находящийся в сильных полях, не должен вносить изменения в картину поля, т.е. шунтировать участки среды, в которой он размещается. Исходя из этого, габариты зонда должны быть минимальными.

2. Противоречащим первому требованию является хороший контакт головки зонда с окружающей средой. Зонд должен иметь минимальное переходное сопротивление «грунт – зонд», которое не должно изменяться при перемещениях зонда. Это сопротивление входит в цепь делителя напряжения, подключаемого к зонду, при этом сопротивление делителя должно быть как минимум на порядок больше переходного сопротивления зонда. На рис.1 приведены параметры делителя напряжения и размеры зонда. В грунте, имеющем влажность от 5% и выше, переходное сопротивление зонда лежало в интервале 19-21 кОм, при этом полное сопротивление делителя составляло 233 кОм, что отвечает требованию соотношения сопротивлений.

Измерения выполнялись двумя зондами. Это позволило получить усредненные значения потенциалов грунта и исключить возможные ошибки измерений. Использование двух зондов позволило также оценить вероятность прорастания искрового канала в область нахождения зонда. Устройство, в котором выполнены данные измерения, приведено на рис.2.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-00573).

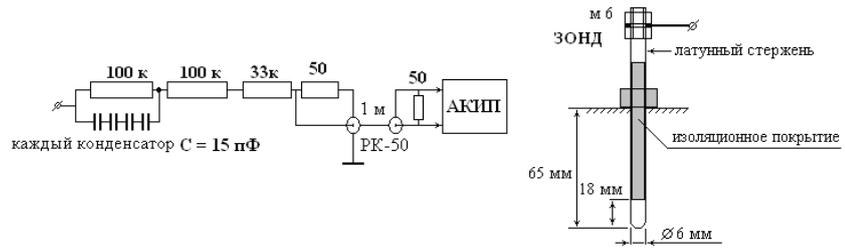


Рис.1. Параметры делителя напряжения и конструкция зонда

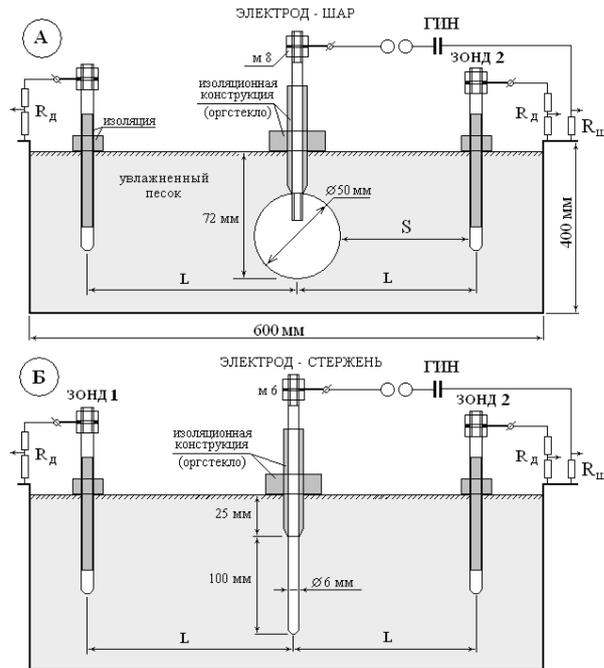


Рис.2. Устройство для проведения экспериментов по измерению распределения потенциалов в грунте с помощью зондов

Рисунок условный, реальное соотношение размеров бака и электрода с зондами можно оценить по приведенным на рисунке размерам. Максимальные расстояния от электрода до зонда были на порядок меньше расстояния от зонда до металлического бака, за счет чего снижалось влияние краевых эффектов.

Исследования выполнены на двух типах электродов: сферическом и вертикальном стержневом. Влажный грунт имел удельное сопротивление $\rho \approx 900 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

В качестве ГИН использован генератор с емкостью в ударе 0.1 мкФ [4]. Измерения выполнены при двух импульсных напряжениях 30 и 45 кВ. На рис.3 приведены осциллограммы импульсных напряжений, токов и расчетных сопротивлений электродов в грунте. Зависимость сопротивления показывает, что в грунте происходило активное искрообразование.

Результаты исследований распределения потенциалов в грунте при импульсных воздействиях представлены на графиках (рис.4, 5).

Приведенные зависимости построены по полученным осциллограммам, на которых искровые каналы, разрастающиеся в грунте в стороны от электрода, не замыкаются на зонд. При замыкании канала на зонд или на оба зонда потенциал грунта в этой точке равен разности потенциала электрода и падения напряжения в искровом канале.

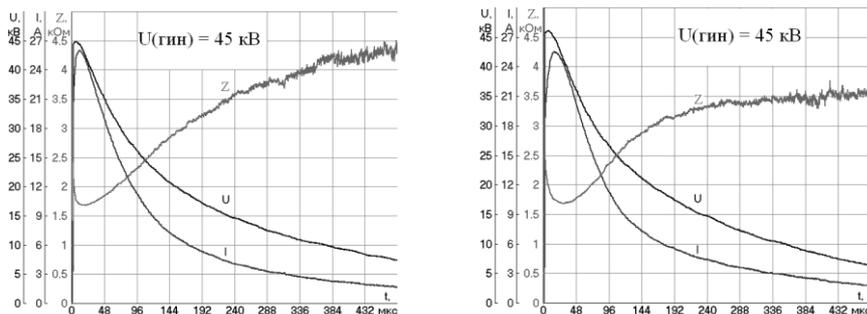


Рис.3. Импульс на входе сферического электрода (слева) и вертикального стержня (справа)

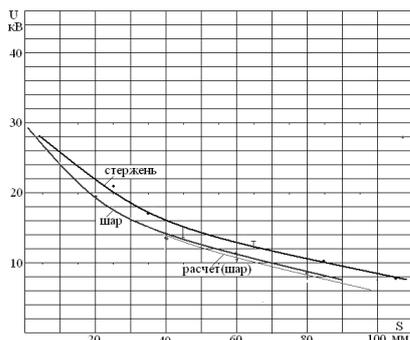


Рис.4. Зондовые измерения потенциалов грунта при напряжении ГИН $U=30$ кВ

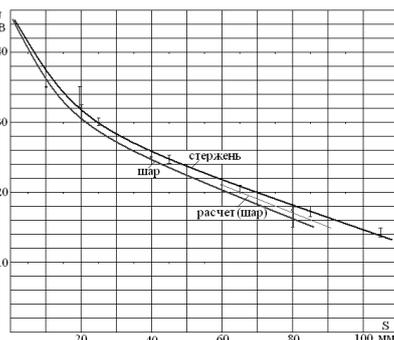


Рис.5. Зондовые измерения потенциалов грунта при напряжении ГИН $U=45$ кВ

Из данных рисунков видно, что расчетные зависимости для шарового электрода совпадают с экспериментальными только при расстояниях, на которых искровые процессы, приводящие к снижению эффективных значений удельного сопротивления грунта, отсутствуют.

Можно отметить, что при условиях искрообразования в грунте зависимости для разных типов электродов довольно близки друг к другу.

Исследования скорости роста искровых каналов в грунте. Методика определения скорости роста искровых каналов в грунте заключалась в следующем. Используя ту же систему размещения зондов относительно электрода в грунте, что и в предыдущих опытах, по осциллограммам напряжения на зондах (рис.6) определялось время прорастания искрового канала в грунте до одного из зондов или до обоих зондов.

Скорость определялась как отношение расстояния от электрода до зонда ко времени прорастания. При прорастании искрового канала до зонда его потенциал скачком возрастал до значения потенциала электрода минус падение напряжения в искровом канале. На рис.6 приведены совмещенные осциллограммы потенциалов на зондах, размещенных по обе стороны от сферического электрода на расстояниях 25 мм. Первый зонд перехватил искровой канал, при этом время прорастания канала составило 2.5 мкс. Следовательно, скорость роста канала равнялась 10^4 м/с. Опыты по определению скорости многократно дублировались, поскольку процесс перехвата искрового канала зонда статистический и имел большой разброс.

Измерения этих процессов проводились по той же методике и теми же делителями и осциллографом, что и измерения распределения потенциалов в грунте.

Опыты выполнены при трех напряжениях ГИН: 38, 42 и 50 кВ. На рис.7 приведены осциллограммы импульсов напряжения, тока и расчетного сопротивления для напряжения генератора 42 кВ.

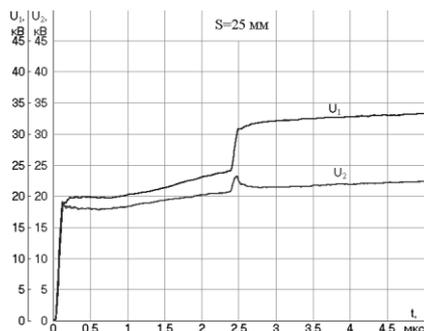


Рис.6. Пример регистрации потенциалов грунта при перекрытии искрового канала на зонд при напряжении 38 кВ

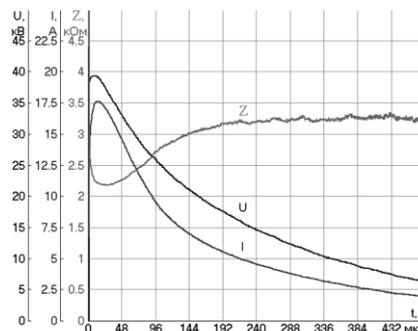


Рис.7. Импульсы на входе электрода при разных напряжениях ГИН

Результаты расчета средних скоростей развития искрового канала в грунте приведены в табл. Данные в таблице получены при обработке не менее 10 осциллограмм при каждом напряжении и расстоянии от электрода до зонда. Вероятность захвата искрового канала зондом определялась отношением числа импульсов, захваченных данным зондом (канал искры попал в данный зонд), к общему количеству импульсов.

Результаты расчета средних скоростей развития искрового канала в грунте

Напряжение на электроде U , кВ	Расстояние от электрода до зонда S , мм	Среднее время прохождения искры от электрода до зонда τ , мкс	Средняя скорость развития искрового канала $V=S/\tau$, мм/мкс	Вероятность захвата искрового канала зондом, %
38	15	1.51	9.93	60
	25	1.99	12.6	40
	35	3.28	7.3	12
42	15	1.24	12.1	68
	25	1.79	14.1	48
	35	1.72	20.6	31
50	35	1.19	29.4	68

Выводы

1. Показано, что при напряженностях электрического поля в грунте, превышающих порог начала искрообразования, распределение потенциалов за счет образования вокруг электродов хорошо проводящих зон практически не зависит от конфигурации электродов.

2. Скорости развития искрового канала в грунте крайне малы, из чего следует, что механизм развития канала перекрытия по поверхности грунта носит характер, отличный от развития канала пробоя внутри грунта. Это отмечалось в ряде работ. В данных опытах обеспечивался принудительный пробой внутри грунта, чтобы оценить скорость составляющей канала пробоя внутри грунта. Измеренные скорости в зависимости от напряжения и расстояния до зонда лежали в диапазоне от 7 до 30 мм/мкс. С ростом напряжения скорость развития канала в грунте возрастает.

3. Выполнена статистическая оценка вероятности развития канала в направлении зондов. В данных опытах вероятности захвата лежат в диапазоне от 12 до 68%. Это значение также зависит от уровня напряжения и расстояния от электрода до зонда. Очевидно, что интенсивность искровых каналов выше вблизи электрода и с удалением от него растут только отдельные искровые каналы, что подтверждается статистикой при зондировании потенциалов в грунте и оптическими исследованиями.

Литература

1. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. М.: Энергия, 1978. 224 с.
2. The potential gradient of ground surface according to shapes of mesh grid grounding electrode using reduced scale model / Chung-Seog Choi, Hyang-Kon Kim, Hyoung-Jun Gil, Woon-Ki Han, Ki-Yeon Lee [Электронный ресурс] // IEE J. The Institute of Electrical Engineers of Japan: сайт. URL: www2.iee.or.jp/ver2/honbu/14-magazine/log/2005/2005_12b_07.pdf
3. Joffe B. Elya, Lock Kai-Sang. Grounds for grounding. A circuit-to-system handbook. A John Wiley & Sons, Inc., Publication. 2010.
4. Лабораторные исследования нелинейных входных сопротивлений заземлителей электроэнергетических устройств в условиях высокого удельного сопротивления грунта / А.Н.Данилин, В.Н.Селиванов, П.И.Прокопчук, В.В.Колобов, М.Б.Баранник // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2011. № 2(5). С. 39-54.

Сведения об авторах

Данилин Аркадий Николаевич,

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

Ивонин Виктор Владимирович,

аспирант Кольского научного центра РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
эл. почта: ivoninviktor@mail.ru

УДК 621.311

А.В.Бурцев, Ю.М.Невретдинов, А.А.Смирнов

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Аннотация

Приведены результаты исследования импульсных характеристик трехфазного силового трансформатора в лабораторных условиях. Выявлено влияние режима нейтрали и токов во вторичной обмотке на формирование грозовых перенапряжений на трансформаторе, изолированной нейтрали и вторичной обмотке. Показаны преимущества лабораторных экспериментов.

Ключевые слова:

грозовые перенапряжения, силовой трансформатор, импульсные характеристики.

A.V.Burtsev, Y.M.Nevretdinov, A.A.Smirnov

LABORATORY EXPERIMENTAL RESEARCH OF POWER TRANSFORMER PULSE CHARACTERISTICS

Abstract

The laboratory research results of the three-phase power transformer pulse characteristics are given. The influence of neutral mode and secondary winding currents on formation of storm overvoltages on the transformer, the isolated neutral and a secondary winding is revealed. Advantages of laboratory experiments are shown.

Keywords:

storm overvoltages, power transformer, pulse characteristics.

Специфика процессов эмиссии электромагнитных импульсов в силовом трансформаторе определяется волновыми свойствами его обмоток, емкостными и магнитными связями обмоток, корпуса и магнитной системы. Экспериментальные исследования, выполненные в 1970-1980-х гг., показали достаточность емкостной трактовки влияния трансформатора на грозовые перенапряжения [1] и возможность использования частотного метода для прогнозирования перенапряжений в нейтрали и во вторичных обмотках.

Эксперименты, выполненные в 2011-2012 гг. на подстанциях 330 и 110 кВ, показали недостаточность частотной интерпретации функции передачи электромагнитных возмущений в каналах «обмотка ВН – нейтраль» [2, 3]. Это определило основные задачи экспериментальных исследований – на современном уровне техники экспериментов выявить влияние режимов нейтрали на формирование перенапряжений.

В статье приведены некоторые результаты лабораторных экспериментов, выполненных на трехфазном 2-обмоточном силовом трансформаторе. Процессы эмиссии электромагнитных импульсов в обследованном трансформаторе принципиально идентичны процессам в высоковольтных силовых трансформаторах. Для трансформаторов обоих типов общими являются трехфазное исполнение и возможность изменения режима заземления нейтрали первичной обмотки. Особенности лабораторных исследований – это:

- отсутствие металлического корпуса и, соответственно, существенное уменьшение влияния емкости обмоток на заземленные элементы;
- возможность изменения схемы вторичной обмотки и изучения влияния токов в ней на импульсные процессы.

Схема экспериментов приведена на рис. 1.

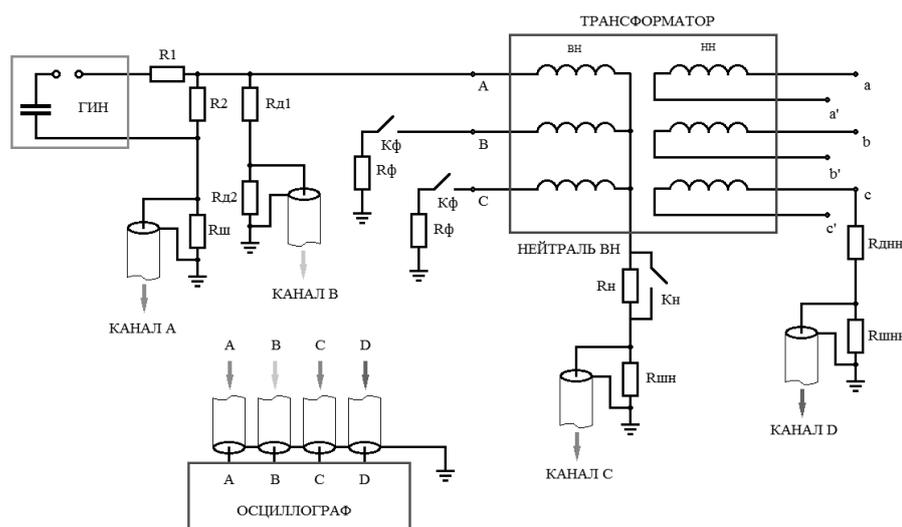


Рис. 1. Схема лабораторных экспериментальных исследований трансформатора

Генератор импульсных напряжений подключен к вводу фазы А обмотки стороны высокого напряжения (ВН) трансформатора с помощью делителя напряжения $R1-R2$. Эквивалентное сопротивление источника ГИН в экспериментах составило 330 Ом. Согласующие сопротивления обмоток фаз В и С также равны 330 Ом. Для измерения напряжений использованы делители:

- $R_{л1} - R_{л2}$ на вводе ВН (канал А осциллографа);
- $R_{н} - R_{шн}$ в нейтрали обмотки ВН (канал С осциллографа);
- $R_{днн} - R_{шнн}$ на выводах обмотки низкой стороны (НН) (канал D осциллографа).

Измерения токов выполнены с помощью шунтов $R_{ш}$ в цепи подключения ГИН на вводе ВН трансформатора (канал В) и в нейтрали при замыкании резистора $R_{н}$.

Вторичная обмотка в экспериментах включалась в «треугольник» или в «звезду» (аналог разрывам фазных обмоток).

Сопоставление осциллограмм импульсных напряжений и токов на вводе фазы обмотки ВН приведено на рис.2.

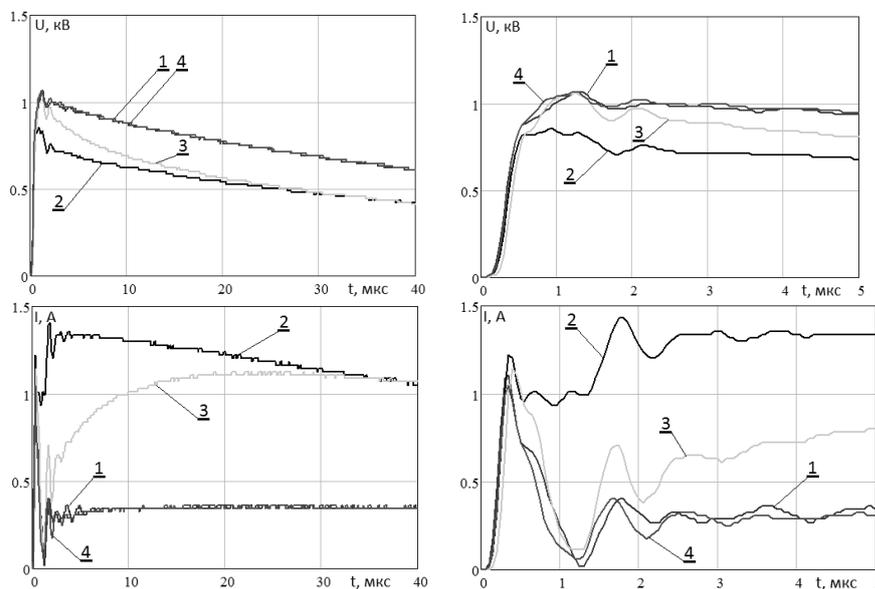


Рис.2. Осциллограммы напряжений (вверху) и токов (внизу) на вводе фазы ВН при изменении режима нейтрали обмотки ВН и схемы соединения вторичной обмотки. Здесь и далее приняты следующие обозначения:

1 – сторона НН включена в «треугольник», нейтраль изолирована; 2 – сторона НН включена в «треугольник», нейтраль заземлена; 3 – сторона НН включена в «звезду», нейтраль заземлена; 4 – сторона НН включена в «звезду», нейтраль изолирована

Как видно, осциллограммы совпадают в режимах с изолированной нейтралью трансформатора и обмоткой НН, включенной в «треугольник» (режим 1) или в «звезду» (режим 4).

Существенное изменение – снижение напряжения и увеличение тока на вводе обмотки ВН – происходит при заземлении нейтрали ВН и включении обмотки НН в «треугольник». Разрыв «треугольника» обмотки НН создает промежуточный характер изменения напряжения и тока на вводе обмотки ВН: в начальный момент (примерно до 1.5 мкс) процесс практически совпадает с процессами в режимах с изолированной нейтралью (режимы 1, 4), а затем переходит в режим 2.

Влияние схемы включения обмотки НН иллюстрируется на примере напряжения на изоляции изолированной нейтрали, приведенной на рис.3.

Напряжение в нейтрали достигает 45–47% от амплитуды импульсного напряжения на вводах ВН трансформатора. В начальной стадии наблюдается наложение колебательного процесса, по всей вероятности, обусловленного отражениями в фазе первичной обмотки (оба режима). Затем частота колебательного процесса снижается примерно в три раза. Это можно объяснить влиянием параллельного включения фазных обмоток ВН, что наблюдается в режиме 4 при существенном снижении влияния обмотки НН. В режиме 1 – при включении обмотки НН в треугольник и появлении в ней размагничивающего тока.

Для оценки возможности использования динамической входной характеристики в виде изменения мгновенных значений входного сопротивления трансформатора

$$Rk(t) = \frac{U_{ВН}(t)}{I_{ВН}(t)}$$

получены зависимости, приведенные на рис.4.

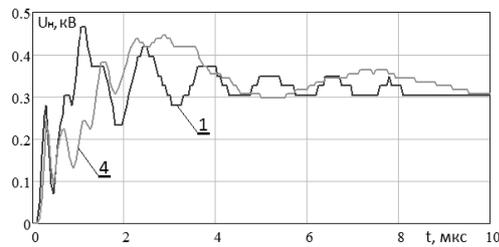


Рис.3. Влияние схемы включения обмотки НН на напряжение в нейтрали обмотки ВН (обозначение режимов нейтрали и схем обмотки ВН по рис.2)

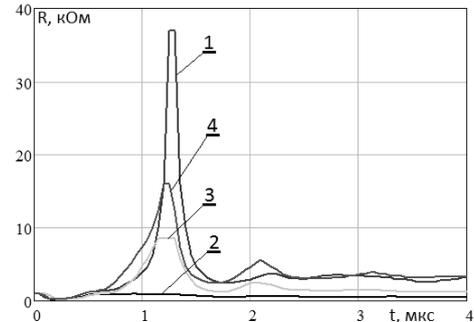


Рис.4. Изменения мгновенных значений входной характеристики обмотки ВН трансформатора для различных режимов заземления нейтрали и схемы включения обмотки НН (обозначения на рис.2)

Как видно, максимум кажущегося входного сопротивления $Rk(t)$ наблюдается около 1.2 мкс и существенно зависит от режима нейтрали и схемы обмотки НН. Наибольшую величину (около 37 кОм) $Rk(1.2 \text{ мкс})$ имеет при изолированной нейтрали и обмотке НН, включенной в «треугольник». При размыкании «треугольника» обмотки НН $Rk(1.2 \text{ мкс})$ снижается почти в 3 раза. В режимах с заземленной нейтралью влияние токов в обмотке НН приводит к снижению $Rk(1.2 \text{ мкс})$ до 10 раз.

Интерпретация зависимости $Rk(t)$ неоднозначна, поэтому по результатам экспериментов рассчитаны частотные характеристики входного сопротивления обмотки ВН трансформатора – изменение гармоник $gZ_{тр}(f)$ в зависимости от частоты. Предварительно получены спектры напряжений и токов на вводе фазы обмотки ВН трансформатора. Гармонические составляющие спектра входного сопротивления трансформатора $gZ_{тр}(f)$ в комплексном виде рассчитаны по гармоникам напряжения $gU_{вн}(f)$ и тока $g\bar{i}_{\hat{a}i}(f)$ на входе $gZ_{тр}(f) = \frac{gU_{вн}(f)}{g\bar{i}_{\hat{a}i}(f)}$.

Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики входного сопротивления трансформатора представлены на рис.5.

Как видно из рис.5, АЧХ входного сопротивления трансформатора существенно различаются в зависимости от режима заземления нейтрали и генерации тока во вторичной обмотке.

Классический вид имеют частотные характеристики только в режиме заземленной нейтрали и при наличии вторичной обмотки, включенной в «треугольник», т.е. на низкой частоте – активно-индуктивный характер, затем при повышении частоты (до 600 кГц для данного трансформатора) – резонанс, затем активно-емкостной характер входного сопротивления и возникновение резонансных явлений в области 1 МГц и выше.

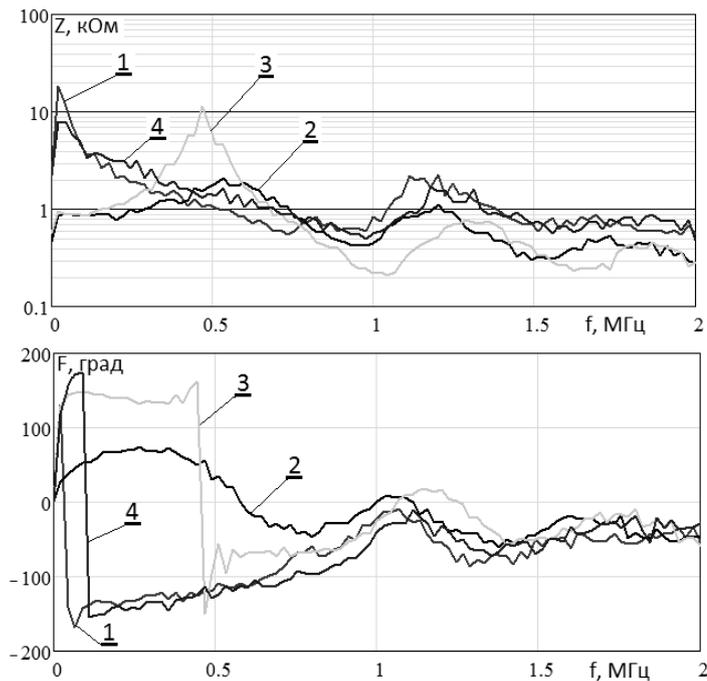


Рис.5. Сопоставление АЧХ (вверху) и ФЧХ (внизу) входного сопротивления обмотки ВН для различных режимов нейтрали и схем включения вторичной обмотки НН (обозначения на рис.2)

В остальных режимах с изолированной нейтралью, а также при размыкании «треугольника» обмотки НН характер входного сопротивления меняется – ФЧХ входного сопротивления попадает в 3-ю и 4-ю четверти, что, возможно, вызвано усилением влияния отражений от нейтрали при ее разземлении, а также при отсутствии размагничивающего тока.

Следует отметить, что представленные результаты получены для бескорпусного трансформатора, т.е. с малой емкостью на землю, а также для вариантов отсутствия вторичной обмотки, включенной в треугольник.

Таким образом, выявлено влияние режима нейтрали обмотки ВН силовых трансформаторов на формирование грозовых перенапряжений и показано влияние схемы вторичной обмотки на формирование перенапряжений на вводах ВН трансформатора, а также на изоляции разземленной нейтрали.

Литература

1. Грозозащита подстанций и электрических машин высокого напряжения / М.В.Костенко, И.М.Богатенков, Ю.А.Михайлов, Ф.Х.Халилов. М.: ВИНТИ, 1987. 112 с.
2. Власко Д.И., Востриков А.О., Невретдинов Ю.М. Грозовые перенапряжения на изоляции нейтрали трансформаторов // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2012. Вып. 4. С. 38-45
3. Домонов А.П., Власко Д.И., Невретдинов Ю.М. Проблемы и перспективы регистраций грозовых перенапряжений на подстанциях // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. (Самара, 21-25 ноября 2011 г.). Самара: СамГТУ, 2011. С. 70-75

Сведения об авторах

Бурцев Антон Владимирович,

старший инженер лаборатории высоковольтной энергетики и технологии
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
эл. почта: tonyburt@rambler.ru

Невретдинов Юрий Масумович,

ведущий научный сотрудник лаборатории высоковольтной энергетики и технологии
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к.т.н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
эл. почта: ymnevrg@mail.ru

Смирнов Андрей Анатольевич,

ведущий инженер отдела буро-взрывных работ Управления ОАО «Апатит»,
Россия, 184250, Мурманская область, г. Кировск, ул. Ленинградская, д. 1
эл. почта: smirnov1104@yandex.ru

УДК 621.314.235

А.Ф.Усов, А.С.Потокин

ИМПУЛЬСНОЕ ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

Проведены экспериментальные исследования энергопереноса в импульсном трансформаторе для целей электроимпульсного разрушения. Показана высокая эффективность передачи напряжения и энергии к породоразрушающему устройству в схеме импульсного трансформатора с контуром обострения фронта высоковольтных импульсов. Обоснована возможность существенного улучшения удельных массогабаритных и энергетических характеристик электротехнологических комплексов электроимпульсного разрушения геоматериалов, открывающая путь к производственному использованию электроимпульсных технологий.

Ключевые слова:

электроимпульсное разрушение, генерирование высоковольтных импульсов, импульсный трансформатор, обострение фронта импульсов.

A.F.Usov, A.S.Potokin

THE PULSED TRANSFORMATION OF VOLTAGE AND ENERGY FOR ELECTRIC PULSE DESTRUCTION OF MATERIALS

Abstract

Experimental study of energy transfer in pulse transformer for the purposes of electric pulse destruction is carried out. The high efficiency of transmission voltage and energy to broken rocks device in the scheme of pulse transformer with circuit of peaking front of high-voltage pulses is shown. The possibility of significant improvement of specific weight, size, and energy characteristics of electric and technological complexes of electric pulse destruction of geomaterials, opening the way to a productive use of electric pulse technology, is proved.

Keywords:

electric pulse destruction, high-voltage pulses generating, pulse transformer, front pulse peaking.

Потребности технического прогресса в горном деле и ряде других отраслей промышленности с технологиями, включающими процессы разрушения материалов, ставят задачи повышения технологической эффективности процессов, снижения энергоемкости разрушения, обеспечения экологической чистоты технологии. К числу потенциально эффективных способов разрушения материалов относится предложенный российскими учеными [1, 2] электроимпульсный (ЭИ) способ разрушения материалов, основанный на использовании взрывного действия канала электрического разряда в твердом теле при выделении в нем энергии емкостного накопителя.

Способ отличается высокой энергетической эффективностью и уникальные технологические особенности, позволяющие его универсально использовать для бурения скважин различного диаметра и назначения, дробления и измельчения руд и технических материалов, резания и поверхностной обработки массива и блочного камня [3-5].

Вместе с тем ни в России, ни за рубежом производственное использование способа пока еще не получило сколько-нибудь заметного распространения. Главная причина этого – несовершенство электротехнического оборудования для реализации способа: ограниченный ресурс работы и неудовлетворительные удельные энергетические и массогабаритные характеристики элементной базы (конденсаторы, зарядные устройства, генераторы импульсов) во многих случаях не обеспечивают технико-экономическую эффективность процессов, имеют недостаточную эксплуатационную надежность работы установок.

Острая необходимость разработки нового класса электротехнического оборудования для электроимпульсных технологий была осознана с самого начала работ по электроимпульсной тематике, и к ее разработке были привлечены специализированные организации Минэлектротехпрома, научные и учебные организации страны, связанные с электротехническим аппаратостроением. В наиболее острой проблеме создания конденсаторов с ресурсом работы, достаточным для проведения научных исследований способа и испытаний технологических установок, достигнут заметный прогресс – ресурс работы конденсаторов повысился на три порядка, конденсаторы ИМ-50-0.2 НПО «Конденсатор» практически обеспечивали гарантированный изготовителем ресурс работы в 10^8 импульсов при частоте следования 20 имп/с. Были разработаны зарядные устройства по схемам выпрямления высокого переменного напряжения промышленной частоты, которые по номиналам напряжения и мощности, возможности управления скоростью заряда, ресурсу работы были пригодны для использования в электроимпульсных технологиях [6]. Это позволило в 1970-1980 гг. создать экспериментальные установки для опробования в производственных условиях широкого спектра новых технологий на основе электроимпульсного разрушения, на результатах которых базируются современные прогнозные оценки технико-физических показателей технологических процессов, обосновываются дальнейшие задачи по совершенствованию техники и технологии способа.

Сейчас, когда электроимпульсный способ разрушения всесторонне изучен и выявлены его безусловные достоинства в технологической эффективности, на первый план встают вопросы совершенствования электротехнического обеспечения технологии, чтобы ликвидировать существенный проигрыш в массогабаритных характеристиках электроимпульсных технологических установок в сравнении с традиционными способами.

Для примера сопоставим характеристики электроимпульсной дезинтеграционной установки с механическими дезинтеграторами. Дробильно-измельчительный комплекс избирательной дезинтеграции геологических проб ДИК-1 [7], рассчитанный на производительность крупного измельчения до 5 мм – 100 кг/ч и до 1 мм – 50 кг/ч

при крупности исходного продукта 80 мм, требует установленной мощности 20 кВт и имеет габаритные размеры 5000×4000×2800 мм (56 м³) и массу 3000 кг. То есть удельная производительность измельчения по классу до 1 мм составляет порядка 1 кг/ч на 1 м³ объема установки и 20 кг/ч на 1 т веса установки и по классу до 5 мм составляет порядка 2 кг/ч на 1 м³ объема установки и 35 кг/ч на 1 т веса установки. Технические характеристики промышленных лабораторных измельчителей на традиционных способах разрушения приведены в табл.1.

Таблица 1

Технические характеристики промышленных лабораторных измельчителей

Тип	Вес, кг	Габариты, мм	Исходная крупность, мм	Конечная крупность, мм	Производительность, мкг/ч	Удельная производительность, на 1 м ³ объема	Удельная производительность, на 1 т веса установки
ДЦ 60×100 (ШД-6)	133	650×330×580	До 55	1...20	30...300	250...2500	225...2255
ДГ 200×125	210	640×480×780	15...30	0.5...8	100...500	476...2381	416...2083
МД 3×2	200	1200×640×800	До 90	0.3...8	50...100	250...500	82...124
КИД-60 (ВКМД-6)	26	380×190×330	До 6	0.2...2	До 10	384.6	500

Как видно, электроимпульсные дезинтеграторы проигрывают традиционным способам дезинтеграции по удельной производительности на 1 т веса установки на порядок и еще более значительней – на два порядка по удельной производительности на 1 м³ объема установки. Проигрыш по массе обусловлен значительным весом зарядного устройства, включающего повышающий трансформатор, блок выпрямления высокого напряжения и устройство регулирования скорости заряда на основе дросселя насыщения, и основная масса приходится на выполненные из железа магнитопровода трансформатора и дросселя насыщения. Проигрыш по габаритам связан с использованием для генерирования импульсов многоступчатого генератора Аркадьева – Маркса (ГИН). В эксплуатационные размеры установки включены изоляционные промежутки от высоковольтного вывода ГИН на заземляемое ограждение. Анализ габаритных характеристик технологических ГИН в экспериментальных установках КНЦ РАН, разработанных и опробованных в производственных условиях, приведен в табл.2.

Таблица 2

Характеристики энергоэффективности конструкций ГИН электроимпульсных установок

Установка (выходное напряжение, кВ/разрядная емкость, мкФ)	Конденсатор	По габаритным размерам			По эксплуатационным размерам		
		К1, Дж/м ³	К2, кВ/м	К3, %	К1, Дж/м ³	К2, кВ/м	К3, %
Кварц-Слюда (560/0.0178)	КБГП-30-0.2	32	311	-	5.7	200	-
Кварц-П (490/0.0143)	ИМ-50-0.2	245	245	9.1	34.6	163	1.3
Кварц М1 (490/0.0095)	ИС-30-0.2	68	136	0.87	14.4	106	0.18
Кварц М2 (350/0.0133)	ИС-30-0.2	69	97	1.2	12	76	0.21
Кварц ДК1 (350/0.0142)	ИМН-100-0.1	427	312.5	4.52	35.8	165	0.37
ГИН-300-0.0156	КБГП-30-0.25	226	300	3	23.8	184	4.3
ГИНШ-300-0.033	КБМЭГ-50-0.2	241	200	4.5	37	118	0.45

ПРИМЕЧАНИЕ. К1 – удельная энергия объема конструкции генератора; К2 – градиентный коэффициент по напряжению (по отношению к «земле», ограждению); К3 – энергетическая компактность, объемная доля энергонакопителей в объеме установки.

Как следует из приведенных данных, диспропорция в размерах электротехнического и технологического блоков очень значительна – площадь электротехнического блока в 20 раз больше площади, занимаемой измельчительной камерой. В связи с этим следует указать еще на один аспект проблемы – создание технологических комплексов на производительность, сопоставимую с машинами механического принципа действия. Нарращивание параллельно работающих электроимпульсных дезинтеграторов заведомо является проигрышным, оптимально не компоуемым вариантом. Анализ характеристик электроимпульсных измельчительных машин производительностью 1 т/ч, приведенных в [4], дает чуть лучший, но все еще неудовлетворительный результат.

В последние два десятилетия были обоснованы возможности существенного улучшения массогабаритных характеристик электротехнологических электроимпульсных установок [8-11]. Электротехническое оборудование на базе зарядных устройств по схеме высокочастотного преобразования напряжения и генераторов импульсов на базе импульсных трансформаторов способно на порядок улучшить массогабаритные характеристики электроимпульсных установок и открыть путь к созданию технологических комплексов повышенной производительности с оптимальной компоновкой электротехнической и технологической частей установки. Произошедший в последние два десятилетия революционный прорыв в выпрямительной технике, связанный с совершенствованием полупроводниковой элементной базы и ферромагнитных материалов и с переходом к схемам высокочастотного преобразования напряжения, позволяет практически на два порядка улучшить массогабаритные характеристики зарядных устройств, повысить КПД энергопреобразования. В России и за рубежом освоено производство источников питания нового класса, и они практически вытеснили все прежние модели источников питания в промышленности, которые работали от сети переменного тока, в том числе даже модели с высоким уровнем выходной мощности. Новые источники питания по уровню напряжения и мощности в достаточной мере отвечают требованиям, предъявляемым условиями электроимпульсной технологии, и дальнейшие исследования по проблеме зарядных устройств сводятся к вопросам их адаптации к разрядно-импульсному режиму работы генераторов импульсов и высокому уровню рабочих напряжений.

Импульсные трансформаторы (ИТ) в схемах генерирования высоковольтных импульсов. Разработка генерирующей аппаратуры для электроимпульсной технологии на основе импульсных трансформаторов в КНЦ РАН была начата еще в 1970-х гг. Импульсное трансформирование с целью существенного уменьшения габаритов и веса генератора импульсов рассматривалось как альтернатива схеме многоступенчатого генератора Аркадьева – Маркса. С учетом опыта использования импульсных трансформаторов в импульсной технике в [12] были предложены возможные схемные решения импульсного трансформирования для электроимпульсной технологии. В разработке конструкций импульсных трансформаторов приняли участие Тольяттинский филиал Всесоюзного энергетического института (ТФ ВЭИ) и Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры (НИИЭФА). В варианте погружного исполнения в скважину (ТФ ВЭИ) использована схема каскадного умножения (рис.1а), а в варианте для наземного исполнения для технологий, предусматривающих использование в качестве рабочей среды воды, – схема однокаскадного трансформирования с контуром обострения высоковольтных импульсов (рис.1б) (ВНИИЭФА). В качестве магнитопровода в трансформаторах использовалось трансформаторное железо.

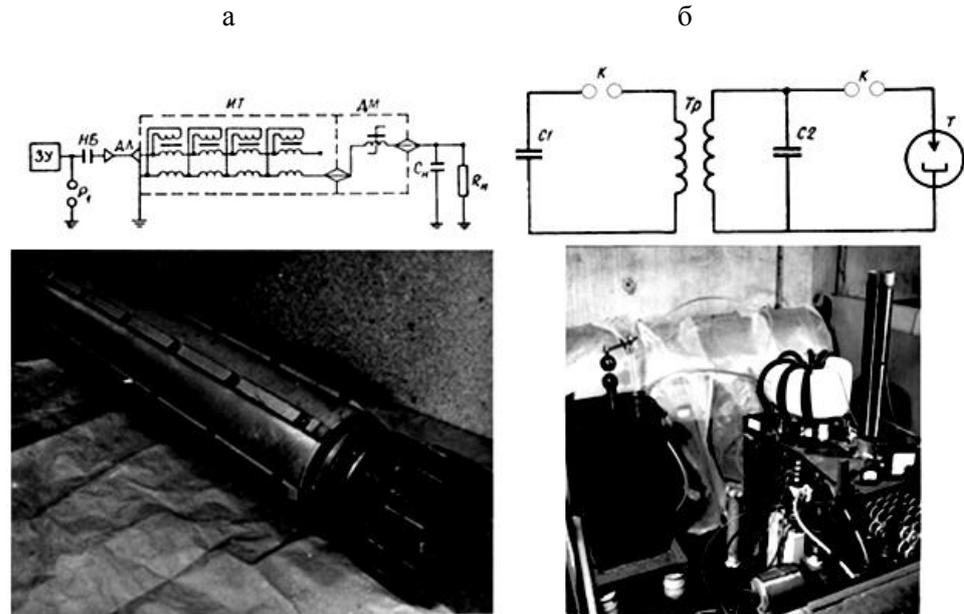


Рис.1. Схема и конструкция импульсных трансформаторов для электроимпульсных установок:
а – в погружном исполнении; б – в наземном исполнении

Испытание многокаскадного ИТ указало на тот недостаток, что при разряде накопительной емкости через ИТ высокое волновое сопротивление цепи разряда существенно ограничивает мощность импульса, значительно снижая эффективность разрушения, а работа схемы должна предусматривать размагничивание магнитопровода. Сердечник ИТ имеет значительное сечение и вес, и это осложняет процесс промывки скважины и манипулирования буровым инструментом.

Однокаскадный трансформатор с контуром обострения высоковольтных импульсов не был доработан (по финансовым причинам), но схему трансформирования целесообразно и сейчас рассматривать как путь для существенного снижения веса ИТ, сочетая исполнение магнитопровода из материалов с высокой магнитной проницаемостью с оптимизацией параметров разрядного контура для обеспечения максимального КПД передачи энергии из первичного контура импульсного трансформатора в обостряющую емкость и далее в канал разряда в породе с требуемым режимом выделения энергии [12].

Анализ энергопереноса в импульсных трансформаторах для электроимпульсного разрушения материалов. Экспериментальные исследования переходного процесса в ИТ были выполнены на моделях ИТ с магнитопроводом из материалов с высокой магнитной проницаемостью. Исполнение разомкнутого магнитопровода из феррита снимает проблему необходимости его постоянного размагничивания. Представленные на рис.2 ИТ отличаются друг от друга компоновкой обмоток и уровнем рабочего напряжения.

ИТТ-10/52-50 – импульсный трансформатор с трапецидальной вторичной обмоткой (трансформатор цилиндрический, диаметр трансформатора $d=81$ мм, высота $h=80$ мм). Первичная обмотка содержит 10 витков (диаметр провода $d=3.2$ мм), вторичная обмотка содержит 52 витка (диаметр провода $d=1.5$ мм). Сердечник ИТ состоит из 10 ферритовых колец ($45 \times 28 \times 8$). Рабочее напряжение – 50 кВ.

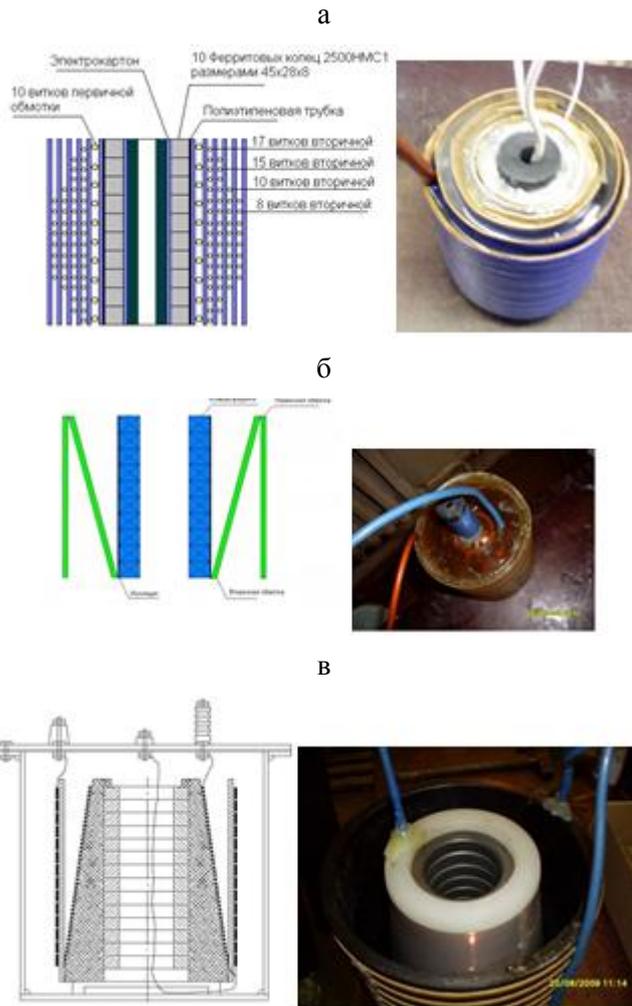


Рис.2. Конструкции импульсных трансформаторов:
 а – ИТТ-10/52-50; б – ИТК-12/72-50; в – ИТК-15/105-350

ИТК-12/72-50 – импульсный трансформатор с конической вторичной внутренней обмоткой (трансформатор цилиндрический, диаметр трансформатора $d=130$ мм, высота $h=100$ мм). Первичная обмотка содержит 12 витков (диаметр провода $d=4$ мм), вторичная обмотка содержит 72 витка (диаметр провода $d=1$ мм). Сердечник ИТ состоит из 10 ферритовых колец ($45 \times 28 \times 8$). Рабочее напряжение – 50 кВ.

ИТК-15/105-350 – импульсный трансформатор с конической вторичной внутренней обмоткой (трансформатор цилиндрический, диаметр трансформатора $d=300$ мм, высота $h=350$ мм). Первичная обмотка содержит 15 витков (диаметр провода $d=4$ мм), вторичная обмотка содержит 105 витков (диаметр провода $d=1$ мм). Сердечник ИТ состоит из 15 ферритовых колец ($100 \times 50 \times 15$). Рабочее напряжение – 350 кВ, используется в исследованиях электроимпульсного бурения и дезинтеграции материалов.

Рассмотрен случай, в котором генерирование импульсов осуществляется по схеме обострения фронта высоковольтных импульсов с включением обостряющей емкости на вторичной стороне импульсного трансформатора (рис.3).

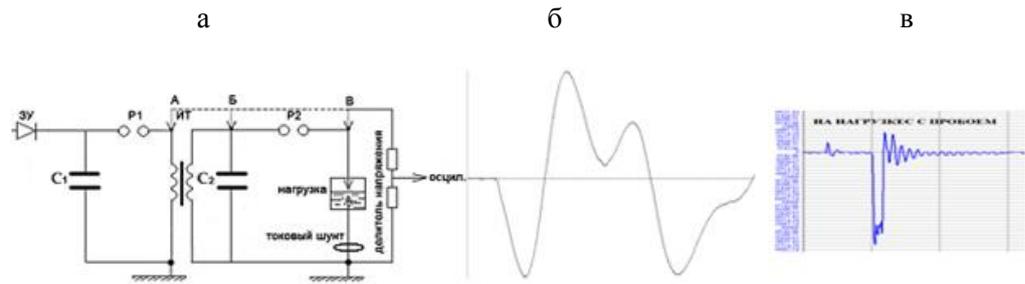


Рис.3. Схема исследования переходного процесса с ИТ (а), осциллограмма напряжения на обостряющей емкости в режиме холостого хода (б), осциллограмма напряжения на нагрузке (в)

В энергопереноске главной составляющей является передача энергии из накопителя C_1 первичного контура импульсного трансформатора W_1 в обостряющую емкость C_2 к моменту первого максимума напряжения W_2 . Энергия обострителя после срабатывания разрядника P_2 расходуется на формирование импульса напряжения на нагрузке, формирование электрического пробоя и последующее преобразование энергии канала разряда в работу разрушения твердого тела. Все эти составляющие с неизбежными потерями в коммутаторе P_2 являются необходимыми для реализации процесса электроимпульсного разрушения, составляя в совокупности полезно используемую часть энергии накопителя. Оставшаяся часть энергии относится к потерям и не только в энергетическом плане, но и в приводящем к техническим издержкам. Потери энергии в диэлектрике и обкладках конденсатора-накопителя приводит к его нагреву, снижающему ресурс его работы. Потери в проводниках катушек и магнитопроводе импульсного трансформатора приводят к его нагреву, во избежание которого ИТ необходимо охлаждать, а если этого недостаточно, то вынужденно снижается частота следования импульсов, т.е. производительность процесса. Таким образом, условие максимальной передачи энергии из накопителя первичного контура ИТ в обостряющую емкость соответствует и условию минимальных потерь энергии в ИТ, максимальной производительности технологического процесса.

В исследованиях варьировались значения емкостей первичного и вторичного контуров ИТ, осуществлялась регистрация напряжения заряда накопительной емкости C_1 и импульсного напряжения с первичной (А) и вторичной стороны (В) ИТ. Энергия в обострителе оценивалась по амплитуде первой полуволны напряжения в режиме холостого хода (при отключенной нагрузке).

Зависимость КПД передачи энергии в обостритель для трех конструкций ИТ представлена на рис.4а и 4б.

Из приведенных данных следует, что геометрия высоковольтной катушки ИТ имеет значение для коэффициентов передачи энергии W_2/W_1 . Для импульсного трансформатора ИТК-15/105-350, предназначенного для использования в режиме электроимпульсного разрушения, значение W_2/W_1 достигает почти 0.7, что значительно выше, чем у двух других образцов импульсных трансформаторов.

На рисунках 5 и 6 результаты экспериментальных определений представлены в системе координат, значения которых увязаны с параметрами традиционной схемы замещения ИТ, представленной на рис.7, в которой L_{s1} – индуктивность рассеяния первичной обмотки ИТ; L_{s2} – индуктивность рассеяния вторичной обмотки ИТ; L_m – индуктивность намагничивания ИТ; n – коэффициент трансформации ИТ.

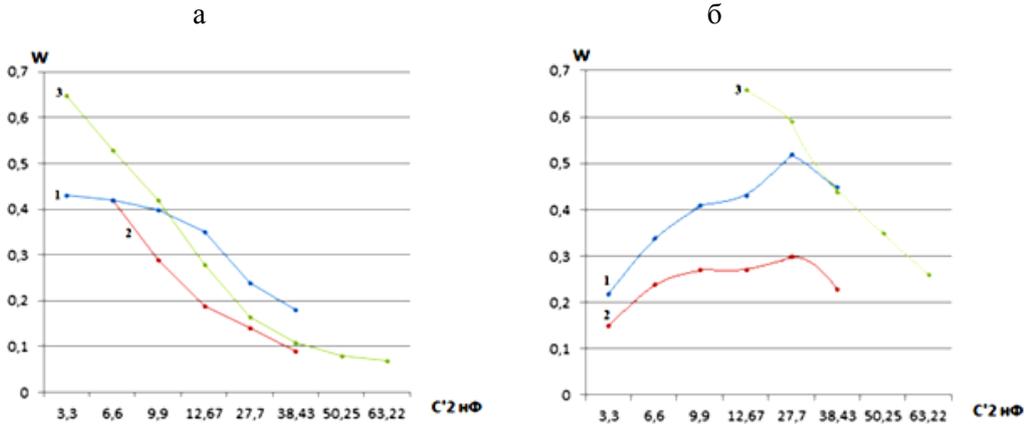


Рис.4. Зависимость W_2/W_1 от C_2 при $C_1=0.5$ мкФ (а); $C_1=0.1$ мкФ (б):
1 – ИТТ-10/52-50; 2 – ИТК-12/72-50; 3 – ИТК-15/105-350

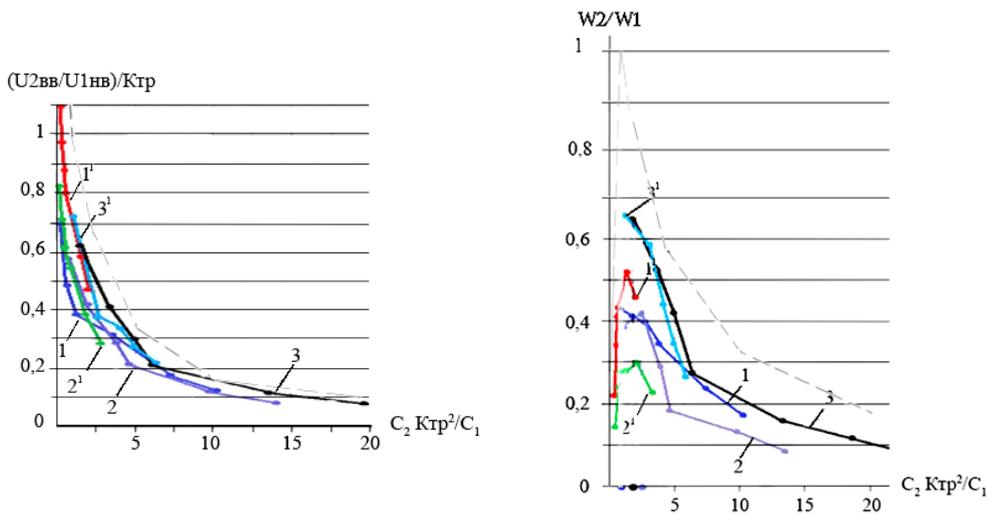


Рис.5. Зависимость $(U_{2вв}/U_{1нв})/K_{тр}$ от $C_2 K_{тр}^2/C_1$:
1 и 1' – ИТК-12/72-50; 2 и 2' – ИТТ10/52-50; 3 и 3' – ИТК15/105-350;
без штриха – $C=0.5$ мкФ; со штрихом – $C=0.1$ мкФ

Рис.6. Энергоперенос в обостритель (доля от энергии накопителя) для различных типов ИТ и соотношения значений накопительной и обостряющей емкости:
1 и 1' – ИТК-12/72-50; 2 и 2' – ИТТ10/52-50; 3 и 3' – ИТК15/105-350;
без штриха – $C=0.5$ мкФ; со штрихом – $C=0.1$ мкФ

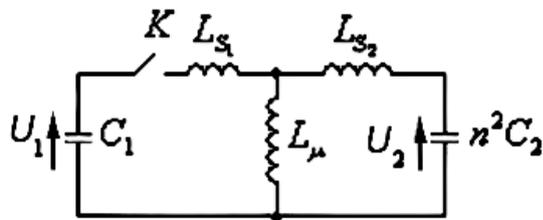


Рис.7. Схема замещения ИТ на холостом ходу

Представленные на рис.5 и 6 экспериментально полученные зависимости дополнены аналитическим расчетом (пунктирные линии) переходного процесса в ИТ по схеме замещения рис.7 в приближении, допускающем отсутствие потерь. Пренебрегая потерями энергии в коммутаторе и токопроводниках ($R_1=0$) и принимая $L_m \gg L_{s1}$ и L_{s2} расчет переходного процесса можно свести к расчету перезаряда емкостей C_1 и C_2 через L_{s1} и L_{s2} . В этом случае значения максимального напряжения на обострителе на амплитуде первой полуволны напряжения будет: $U_2 = n(2/1+k)U_1$, а энергии в обострителе $W_2 = [4k/(1+k)^2]W_1$. Здесь n – коэффициент трансформации; $k = C_2 k_{пр}^2 / C_1$. Для ИТ 15/105-350 кВ уровень потерь энергии в режиме оптимального соотношения емкостей $C_2 k_{пр}^2 / C_1 = 1.0$ достигает 30%, для двух других типов ИТ – 50%. Главный фактор, определяющий уровень заряда обострителя, связан с соотношением скоростей заряда обострителя и разряда накопителя. Снижению уровня потерь будет способствовать снижение индуктивностей рассеяния трансформатора, уменьшение индуктивности петли подсоединения накопителя к ИТ и петли подсоединения импульсного трансформатора к обострителю. В целом модель импульсного трансформатора ИТК-15/105-350 в комплексе с глицириновым обострителем подтвердила работоспособность и энергетическую эффективность для исследования процессов электроимпульсного бурения и дезинтеграции материалов. Элементная база исследовательского стенда представлена на рис.8

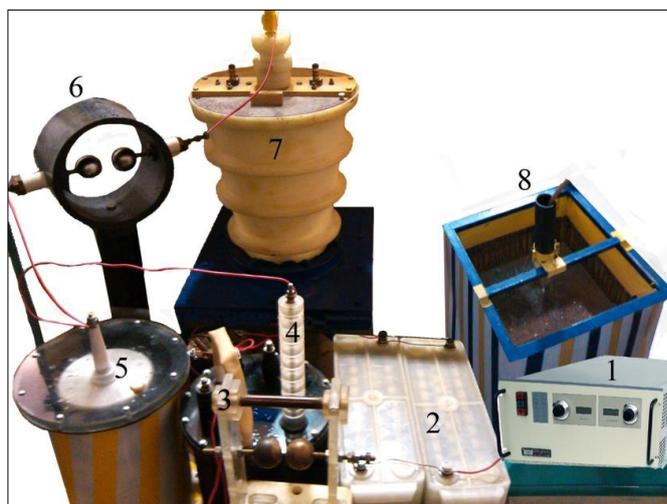


Рис.8. Лабораторный стенд электроимпульсного разрушения материалов:
 1 – зарядное устройство (SR6 Spellman); 2 – конденсаторы C_1 (0.4 мкФ-50 кВ);
 3 – разрядник R_1 ; 4 – импульсный трансформатор ИТК-15/105-350 кВ;
 5 – обостряющий конденсатор C_2 (350 кВ, глицерин); 6 – обостряющий разрядник R_2 ;
 7 – дробильно-измельчительная камера (от установки ДИК-1М);
 8 – стенд бурения (110 мм)

На стенде выполняются работы, предусмотренные программой совместных работ с Университетом науки и технологий Хуажонг (Китай), направленные на совершенствование электротехнического обеспечения электроимпульсных установок с целью создания реальных предпосылок для их использования в производстве.

Литература

1. Способ отбойки и раздробления полезных ископаемых и горных пород: а. с. № 1954-03 с приоритетом от 28.07.1951 / А.А.Воробьев, Е.К. Завадовская.
2. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород / А.А.Воробьев, Г.А.Воробьев, Е.К. Завадовская и др. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1971. 225 с.
3. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. Апатиты: КНЦ РАН, 1995, 276 с.
4. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 324 с.
5. Усов А.Ф. Полувековой юбилей электроимпульсному способу разрушения материалов // Вестник КНЦ РАН. 2012. № 4. С. 165-192.
6. Усов А.Ф., Гладков В.С. Вопросы электротехнического обеспечения технологий электроимпульсного разрушения материалов источниками высоковольтных импульсов // Вестник НТУ «ХПИ». Харьков, 2004. Вып. 35. С. 143-154.
7. Шуляков А.Д., Лупал С.Д., Таракановский Э.Н. Установка избирательной дезинтеграции геологических проб (ДИК-1М) // Обогащение руд. 1989. № 4. С. 45-46.
8. Усов А.Ф., Бородулин В.В. Проблема улучшения удельных массогабаритных и энергетических характеристик технических средств электроимпульсного разрушения материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 9. С. 375-379.
9. Высоковольтный импульсный генератор для электроразрядных технологий / Г.Г.Канаев, В.Р.Кухта, В.В.Лопатин, А.В.Нашилевский, Г.Е.Ремнев, К.Уемура, Э.Г.Фурман // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 1. С. 105-109.
10. High-voltage pulsed generator for dynamic fragmentation of rocks / В.М.Kovalchuk, А. V.Kharlov, V.A.Vizir, V.V.Kumpyak, V.B. Zorin, V.N.Kiselev // Rev. Sci. Instrum. 81. 103506 (2010); doi:10.1063/1.3497307.
11. Усов А.Ф., Потокин А.С. Концептуальные решения для создания компактных мобильных технологических комплексов на основе электроимпульсного способа разрушения материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 2. С. 260-269.
12. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. Л.: Наука, 1987. 179 с.

Сведения об авторах

Усов Анатолий Федорович,

начальник научно-организационного отдела КНЦ РАН, старший научный сотрудник Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к.т.н.
184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14,
тел. (81555)79226, эл. почта: usov@admksk.apatity.ru

Потокин Александр Сергеевич,

младший научный сотрудник Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14
тел. (81555)79516, эл. почта: student_noo@admka.apatity.ru

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

УДК 621.311

О.В.Залесова, М.В.Якубович

НАВЕДЕННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОТКЛЮЧЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, ВЫЗВАННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЯГОВОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Аннотация

Рассмотрены вопросы воздействия тяговой сети железной дороги переменного тока на близлежащие линии электропередачи, выведенные в ремонт. Исследованы наведенные напряжения на отключенных воздушных линиях при движении по однопутному участку железной дороги одного и двух составов.

Ключевые слова:

линия электропередачи; железная дорога, электрифицированная на переменном токе; электромагнитное влияние, наведенное напряжение.

O.V.Zalesova, M.V.Yakubovich

INDUCED VOLTAGE ON DEENERGIZED OVERHEAD TRANSMISSION LINES CAUSED BY AC RAILWAY OPERATION

Abstract

This article is devoted to the problems of AC railway interference with nearby dead transmission lines. Induced voltage on deenergized transmission lines have been investigated for two cases when one and two trains were moving along the one-track railway section.

Keywords:

overhead transmission line, AC electric railway, electromagnetic interference, induced voltage.

Нагрузка тяговой подстанции является непрерывно меняющейся случайной величиной. Она зависит от многих факторов, в том числе от количества электровазов, находящихся на участке железной дороги, и их местоположения на участке относительно тяговых подстанций. Изменение нагрузки под влиянием любого из факторов будет отражаться на уровне наведенного напряжения на проводах отключенной линии электропередачи (ЛЭП), подверженной влиянию контактной сети железной дороги переменного тока.

Целью данного теоретического исследования было сравнение уровней наведенных напряжений на отключенной ЛЭП при прохождении по участку железной дороги одного и двух составов и выявление наихудшего случая влияния сети железной дороги на ЛЭП. В ходе работы были выполнены многовариантные расчеты наведенного напряжения на проводе отключенной линии электропередачи.

Для исследования была выбрана модель, состоящая из однопутного участка железной дороги переменного тока и отключенной ЛЭП, проходящих параллельно друг другу и расположенных так, что середина линии электропередачи находится напротив середины участка железной дороги (рис.1). Были рассмотрены 5 вариантов модели, отличающихся длиной сближения (длиной ЛЭП) и его шириной. Параметры вариантов представлены в табл.1.

В расчетах были приняты следующие исходные данные: удельное сопротивление грунта $\rho_{гр.}=10000$ Ом·м; линия электропередачи по концам заземлена на сопротивления 0.5 Ом; ток, потребляемый каждым составом, равен 100 А. Величина коэффициента защитного действия рельса задавалась в зависимости от количества электровозов на участке: $k_{зд}=0.55$ – один электровоз; $k_{зд}=0.4$ – два электровоза [1].

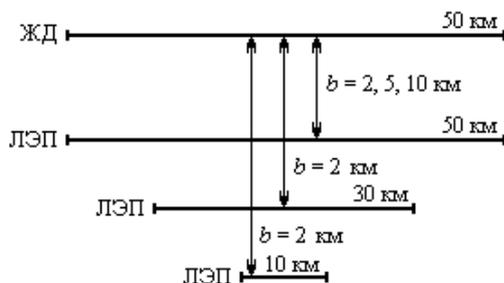


Рис.1. Варианты параллельного сближения ЛЭП с участком железной дороги

Таблица 1

Параметры вариантов сближения ЛЭП с железной дорогой

№ варианта	Длина участка ж.-д. $l_{ж.д.}$ км	Длина сближения (длина ЛЭП) $l_{ЛЭП}$ км	Ширина сближения b , км
1	50	10	2
2	50	30	2
3	50	50	2
4	50	50	5
5	50	50	10

Для каждого варианта модели рассматривались два случая влияния, когда по железнодорожному пути:

- 1 – проходил один электроподвижный состав;
- 2 – проходили два электроподвижных состава.

Соответственно, для каждого варианта модели при различных местах расположения одного и двух электровозов (расстояния между составами также изменялись) на участке железной дороги были рассчитаны значения наведенного напряжения на отключенной линии электропередачи. Методика расчета представлена в [2].

Проведенные для выбранной модели расчеты позволили определить характер распределения наведенного напряжения на отключенной линии в обоих рассматриваемых случаях влияния. Схемы распределения наведенного напряжения представлены на рис.2 и 3.

Исследование показало, что при параллельном сближении железной дороги переменного тока и отключенной линии электропередачи наведенное напряжение на проводах ЛЭП в каждый момент времени имеет максимум в точке линии, находящейся напротив электровоза (при одном составе на участке) или одного из электровозов (при двух составах на участке). Кроме того, наихудшим моментом при равномерном прохождении одиночного состава вдоль отключенной ЛЭП является момент, когда электровоз находится напротив середины линии; в это время наведенное напряжение на середине линии достигает абсолютного максимума.

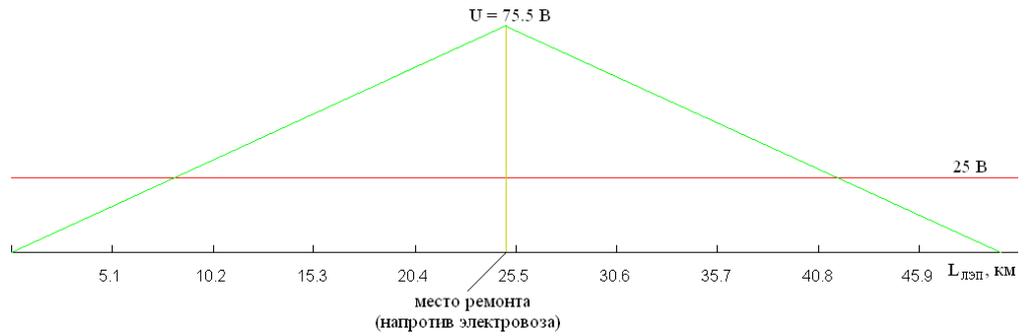


Рис.2. Распределение наведенного напряжения на ЛЭП модели № 3 в момент прохождения состава напротив середины линии

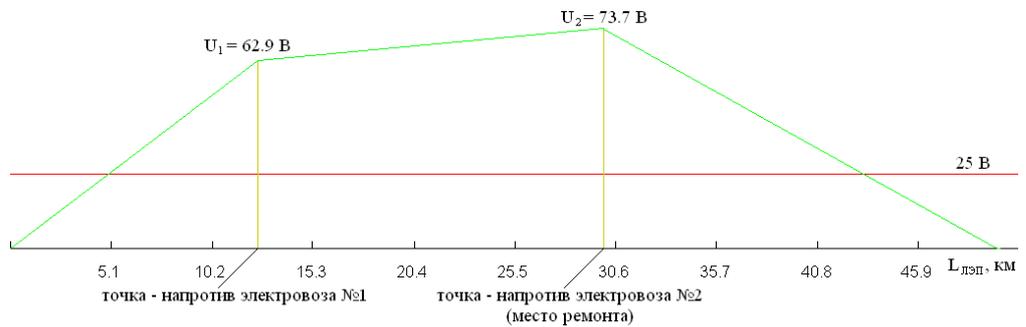


Рис.3. Распределение наведенного напряжения на ЛЭП модели № 3 в момент прохождения первым составом точки 12.5 км, вторым составом – точки 30 км

Расчеты, проведенные в рамках данного исследования, выявили следующую закономерность: если расстояние между двумя электровозами на участке не меньше чем 35% от полной длины ЛЭП ($l_{лэп}$), то максимальное наведенное напряжение на ее проводах $U_{нав}$ не превысит максимального значения этой величины при движении одного электровоза по участку железной дороги. Это условие выполняется независимо от ширины и длины сближения участка железной дороги и ЛЭП.

На рисунках 4-8 в виде графиков представлены результаты расчетов наведенных напряжений на проводе отключенной ЛЭП при движении двух составов по участку железной дороги. Для каждого варианта модели показаны наведенные напряжения при параллельном движении электроподвижных составов на расстоянии $l_{лэп}$, равном 0.3, 0.35 и 0.4 длины линии ($l_{лэп}$). Горизонтальной прямой линией на рисунках обозначен уровень максимального наведенного напряжения на проводе отключенной ЛЭП при движении по участку одного электроподвижного состава. Каждая из двух кривых показывает наведенное напряжение в различных точках линии в момент прохождения по железной дороге напротив них одного из электровозов.

Из рисунков 4-8 видно, что чем меньше расстояние между электровозами, тем выше уровень максимального наведенного напряжения на проводе отключенной линии электропередачи.

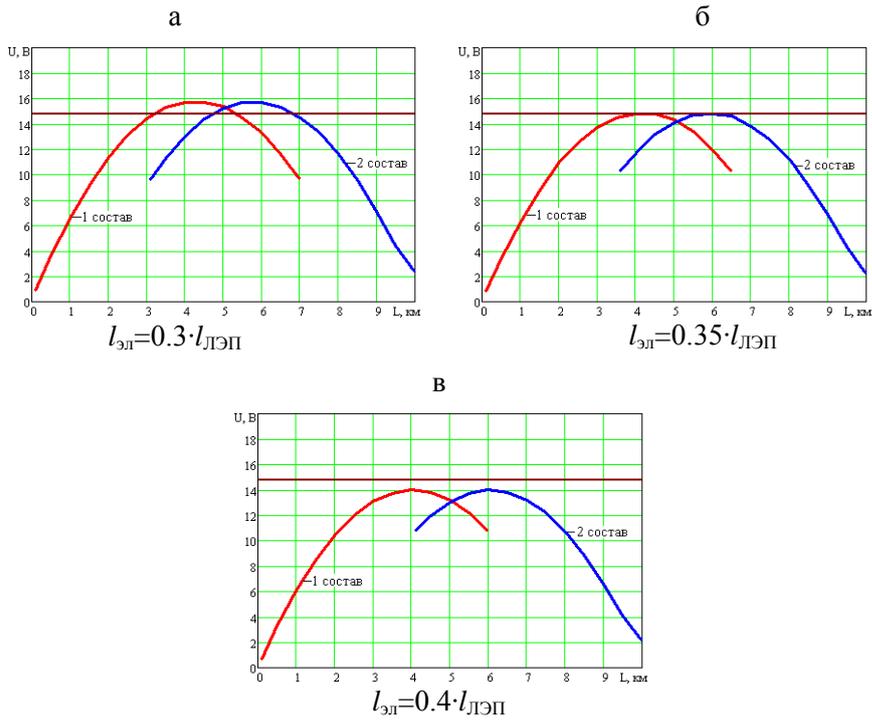


Рис.4. Графики распределения максимальных уровней наведенного напряжения на ЛЭП (ширина сближения $b=2$ км, длина сближения $l_{ЛЭП}=10$ км, $l_{жсд}=50$ км)

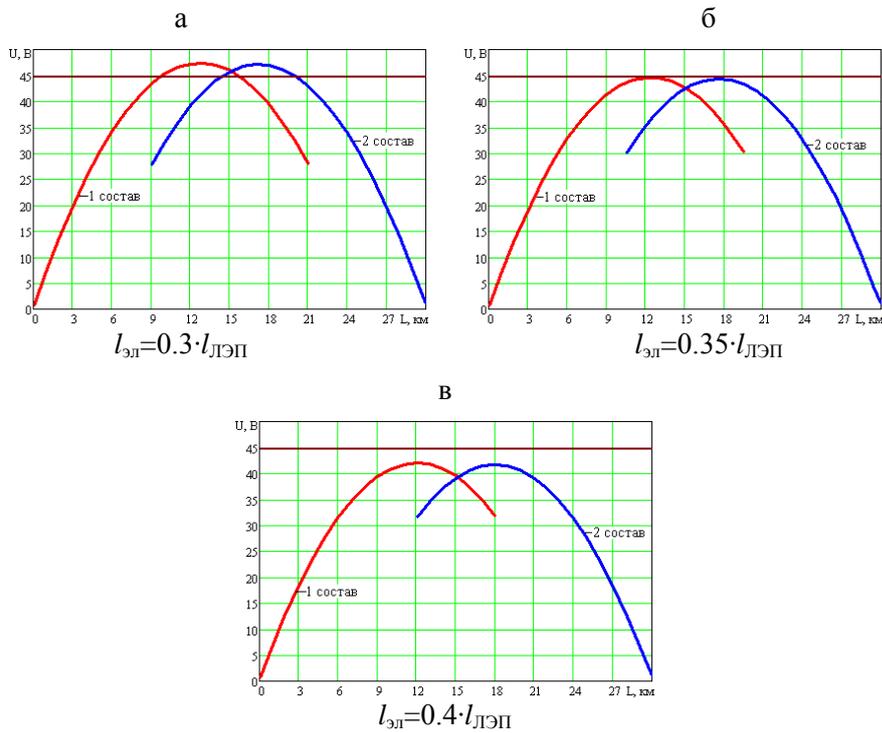


Рис.5. Распределение наведенного напряжения на ЛЭП (ширина сближения $b=2$ км, длина сближения $l_{ЛЭП}=30$ км, $l_{жсд}=50$ км)

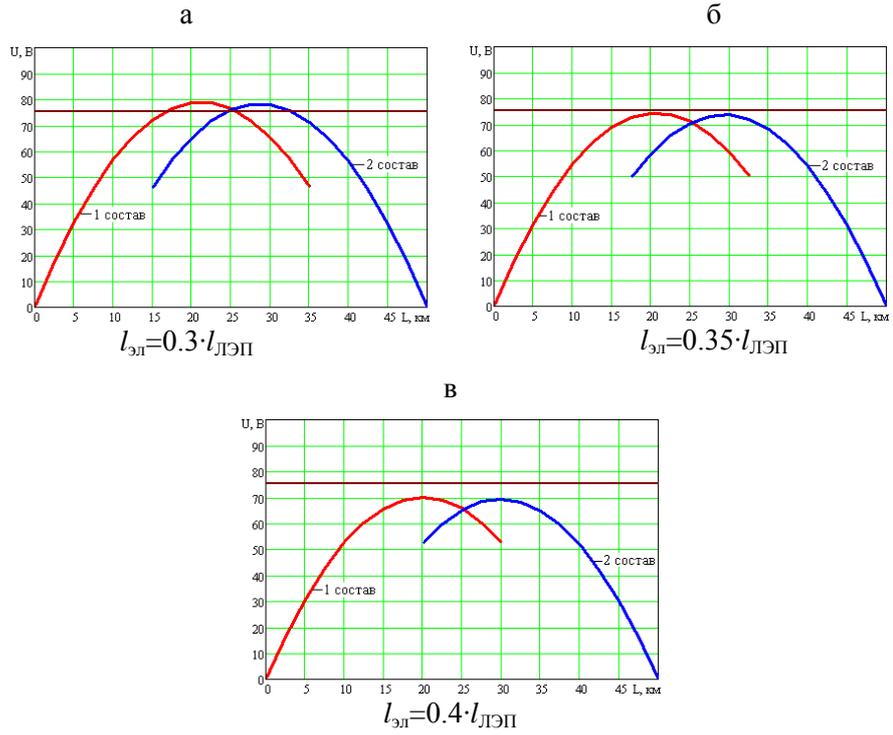


Рис.6. Распределение наведенного напряжения на ЛЭП (ширина сближения $b=2$ км, длина сближения $l_{\text{ЛЭП}}=50$ км, $l_{\text{жсд}}=50$ км)

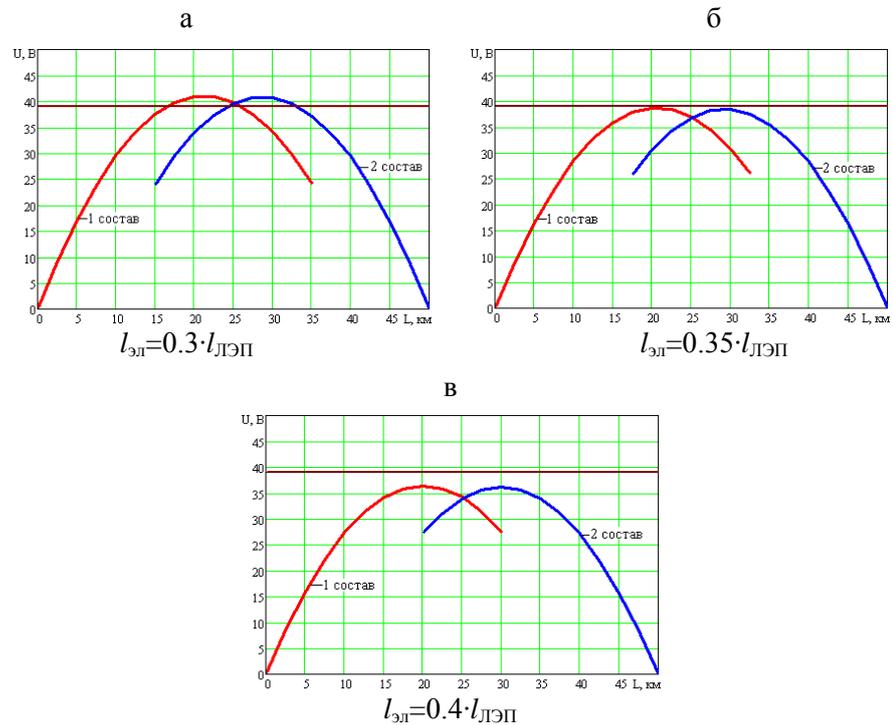


Рис.7. Распределение наведенного напряжения на ЛЭП (ширина сближения $b=5$ км, длина сближения $l_{\text{ЛЭП}}=50$ км, $l_{\text{жсд}}=50$ км)

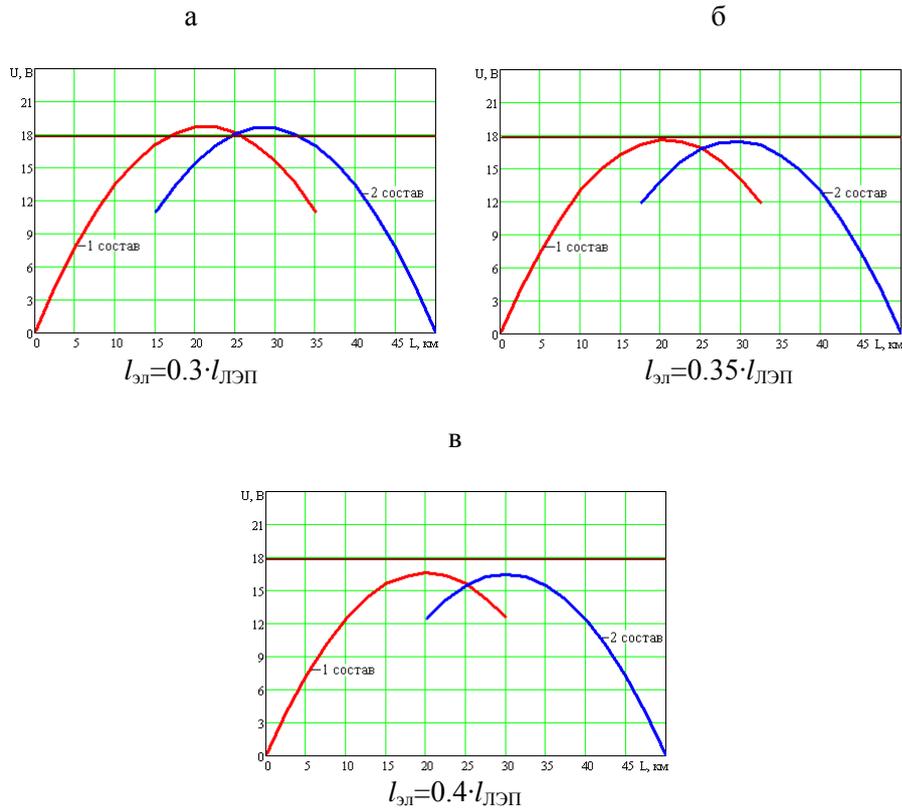


Рис.8. Распределение наведенного напряжения на ЛЭП (ширина сближения $b=10$ км, длина сближения $l_{ЛЭП}=50$ км, $l_{жсд}=50$ км)

Для подтверждения выявленной закономерности (зависимость наведенного напряжения на проводе ЛЭП от соотношения расстояния между электровозами и длины ЛЭП) были проведены аналогичные расчеты наведенного напряжения на проводах реальных ЛЭП, проходящих вблизи действующих участков железной дороги, электрифицированной на переменном токе. Схемы сближения показаны на рис.9. Отличие этих расчетов от расчетов на модели было в том, что участки сближения реальных линий часто располагаются ближе к одному из концов участка железной дороги (рис.9 б-д). Сближение влияющих участков железной дороги с выбранными линиями было приведено к параллельному.

Данные, используемые в расчетах: сопротивление грунта; коэффициент защитного действия рельса; ток, потребляемый каждым электровозом – имели те же значения, что и при первоначальном моделировании. Параметры сближения отключенных и заземленных по концам линий электропередачи с участками железной дороги представлены в табл.2.

Результаты теоретического исследования наведенного напряжения на проводах реальных линий также показали, что, когда расстояние между электровозами, движущимися по однопутному участку железной дороги, больше или равно 35% от полной длины ЛЭП, уровень наведенного напряжения на ее проводе не превышает максимального значения этой величины в случае, когда по участку проходит один электроподвижный состав (рис.10-15).

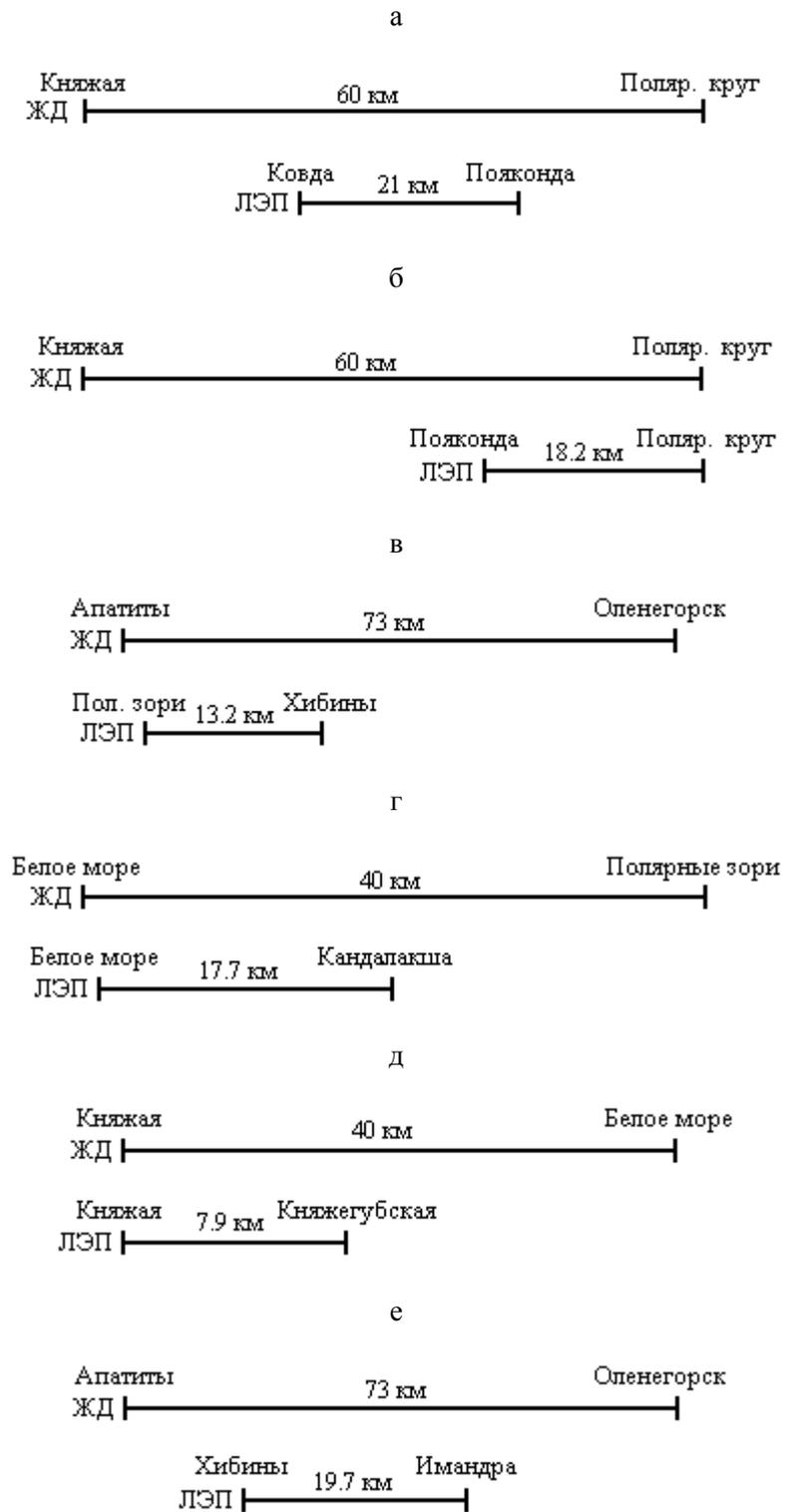


Рис.9. Параллельное сближение линий электропередачи с влияющими участками железной дороги

Таблица 2

Параметры участков сближения железной дороги и линий электропередачи

ЛЭП	Влияющий участок железной дороги	Сближение, км		Длина ЛЭП ($l_{ЛЭП}$), км	Длина вл. участка ж.-д. ($l_{жд}$), км
		ширина b	длина		
Ковда – Пояконда	Княжая – Полярный круг	3.0	20.2	21.0	60.0
Пояконда – Полярный круг	Княжая – Полярный круг	3.0	17.4	18.2	60.0
Апатиты – Хибины	Апатиты – Оленегорск	1.0	13.0	13.2	73.0
Белое море – Кандалакша	Белое море – Полярные зори	0.8	16.2	17.7	40.0
Княжая – Княжегубская	Княжая – Белое море	2.0	7.9	7.9	40.0
Хибины – Имандра	Апатиты – Оленегорск	1.5	19.7	19.7	73.0

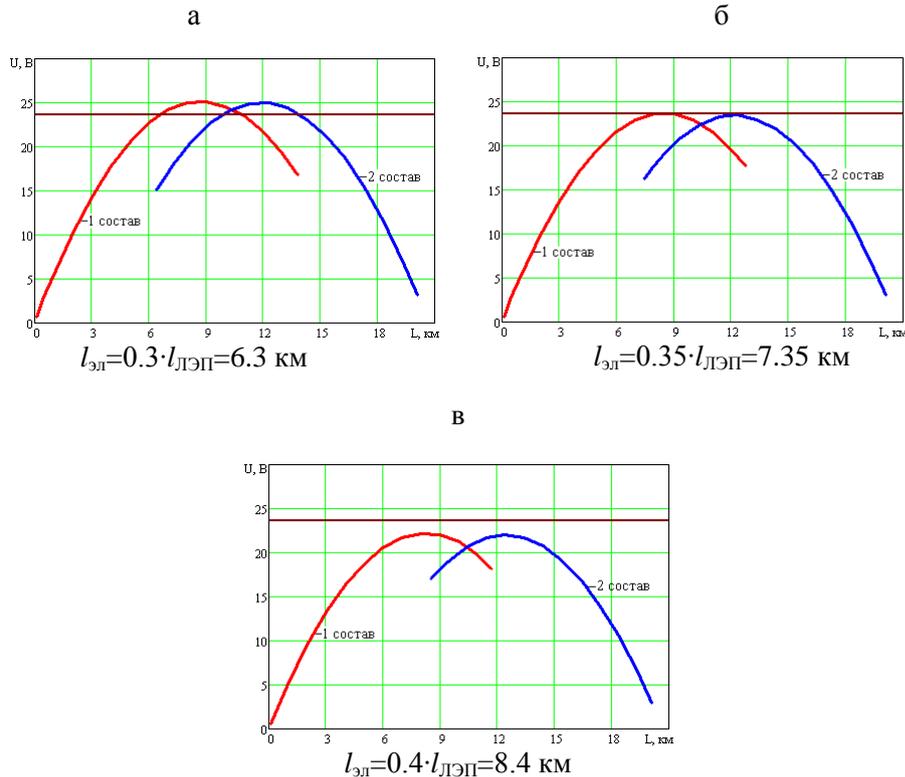


Рис.10. Распределение наведенного напряжения на ЛЭП Ковда – Пояконда (ширина сближения $b=3$ км, длина линии $l_{ЛЭП}=21$ км, $l_{жд}=60$ км)

Расстояние, равное 35% от длины линии электропередачи, проходящей вблизи участка железной дороги переменного тока, в некоторых случаях (если линия имеет небольшую длину) не превышает значения минимального допустимого расстояния между поездами, проходящими в одном направлении пакетом. Последний параметр определяется межпоездным интервалом t_{\min} (минимальный промежуток времени, разграничивающий поезда при следовании по перегонам на участках с автоблокировкой). Он необходим для гарантии безопасного следования по перегонам одного поезда вслед за другим и создания условий, обеспечивающих нормальные скорости движения поездов. Значение межпоездного интервала изменяется в зависимости от скорости движения и массы состава. При электрической тяге интервалы между поездами, находящимися в одном пакете, могут быть доведены до 8-6 мин [3].

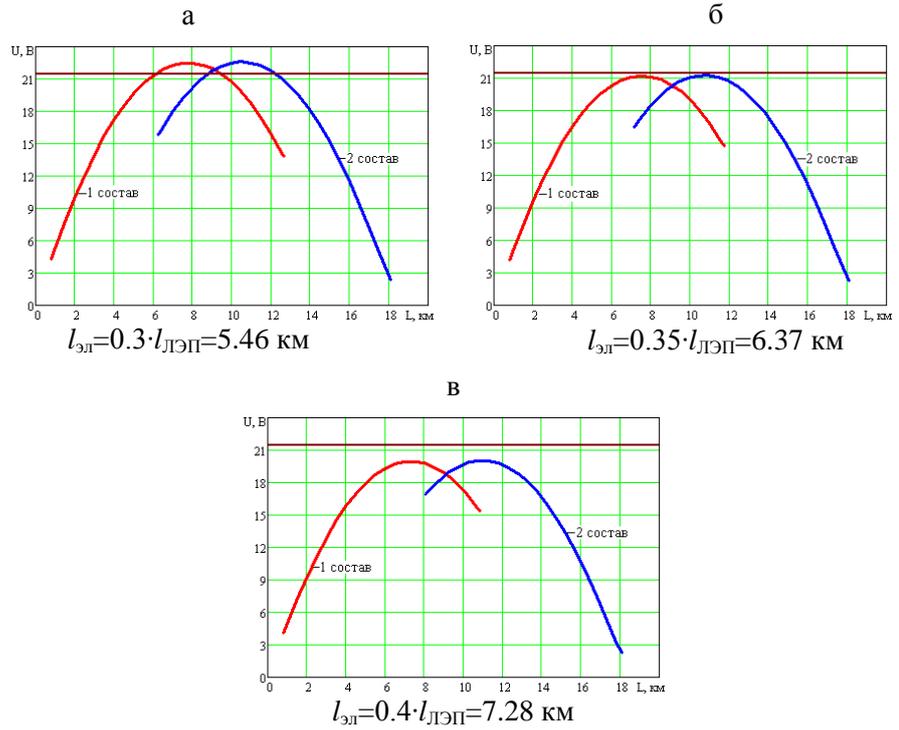


Рис.11. Распределение наведенного напряжения на ЛЭП Пояконда – Полярный круг (ширина сближения $b=3 \text{ км}$, длина линии $l_{ЛЭП}=18.2 \text{ км}$, $l_{жсд}=60 \text{ км}$)

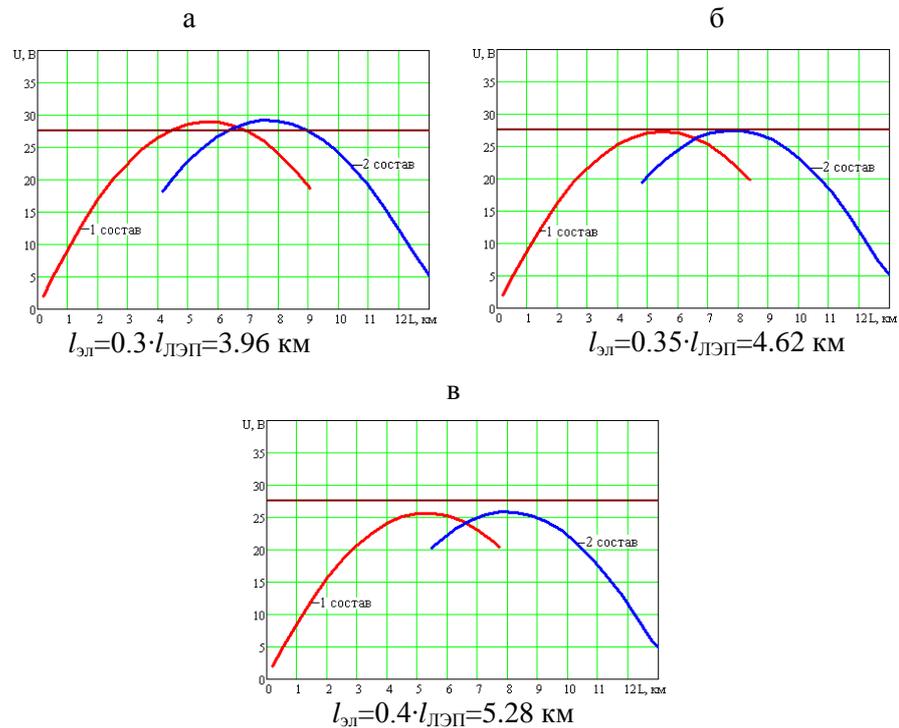


Рис.12. Распределение наведенного напряжения на ЛЭП Анатиты – Хибины (ширина сближения $b=1 \text{ км}$, длина линии $l_{ЛЭП}=13.2 \text{ км}$, $l_{жсд}=73 \text{ км}$)

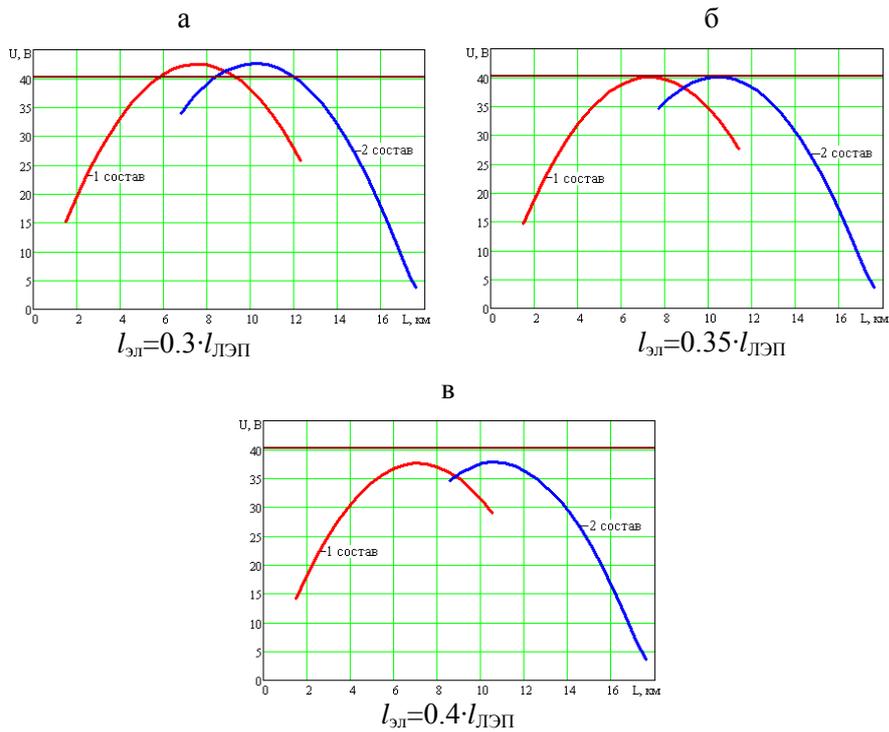


Рис.13. Распределение наведенного напряжения на ЛЭП Белое море – Кандалякша (ширина сближения $b=0.8$ км, длина линии $l_{ЛЭП}=17.7$ км, $l_{жсд}=40$ км)

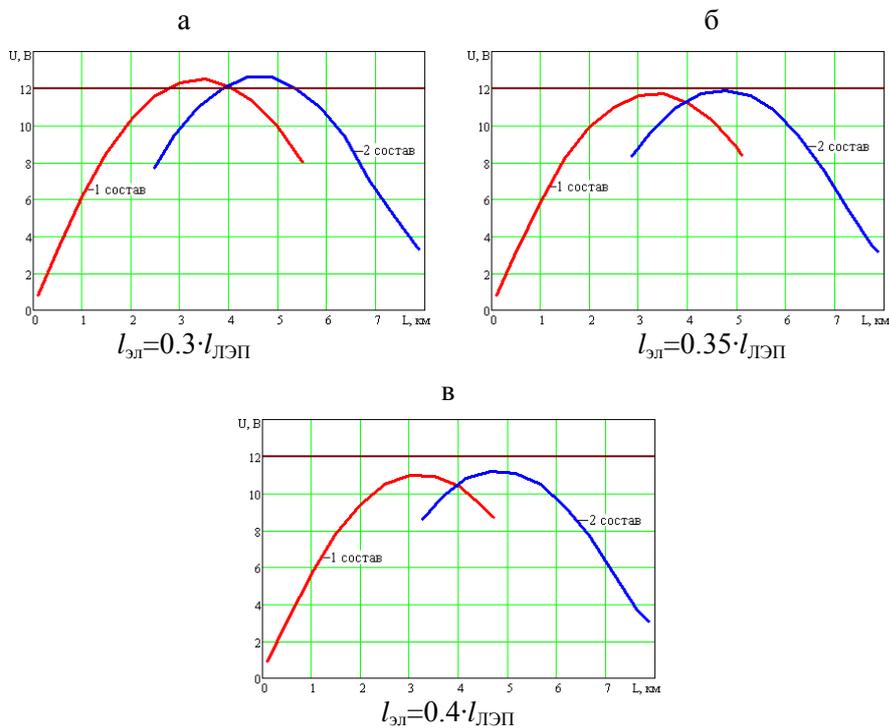


Рис.14. Распределение наведенного напряжения на ЛЭП Княжая – Князегубская (ширина сближения $b=2$ км, длина линии $l_{ЛЭП}=7.9$ км, $l_{жсд}=40$ км)

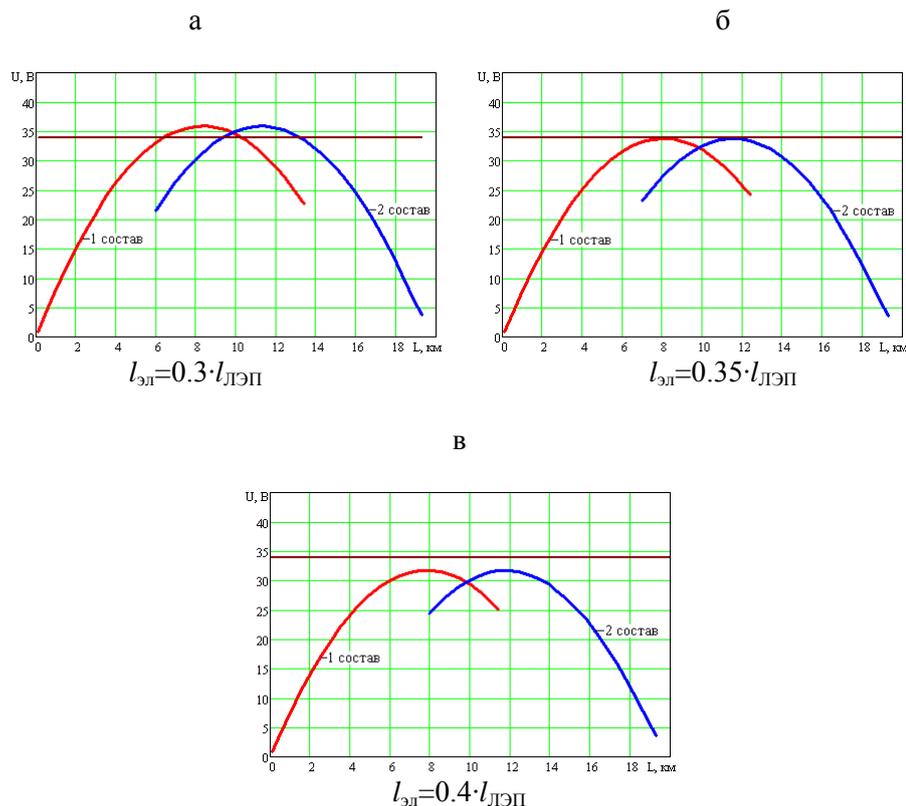


Рис.15. Распределение наведенного напряжения на ЛЭП Хибины – Имандра (ширина сближения $b=1.5$ км, длина линии $l_{лэп}=19.7$ км, $l_{жсд}=73$ км)

В таблице 3 представлены минимально допустимые расстояния между поездами S , идущими в одном направлении в пакете, в зависимости от межпоездного интервала $t_{мин}$ и скорости, с которой они движутся. Если принять среднюю скорость, с которой движется поезд по участку железной дороги, равной 70 км/ч, то расстояние между составами, идущими в одном направлении по одному пути, не должно превышать 7.0 км (при минимальном значении межпоездного интервала $t_{мин}=6$ мин). Таким образом, можно определить, что из шести исследуемых реальных ЛЭП только на одной линии (Ковда – Пояконда) уровень наведенного напряжения во втором случае (когда по участку железной дороги проходят два электроподвижных состава) может превысить максимальный уровень напряжения, наведенного на этой линии в первом случае (на участке железной дороги находится один состав).

Таблица 3

Минимально допустимые интервалы между поездами

Время t , мин	Минимально допустимое расстояние между поездами S , км			
	$V_{эл}=60$ км/ч	$V_{эл}=70$ км/ч	$V_{эл}=80$ км/ч	$V_{эл}=90$ км/ч
6	6.0	7.0	8.0	9.0
7	7.0	8.2	9.3	10.5
8	8.0	9.3	10.7	12.0

Из таблицы 3 видно, что чем меньше скорость движения каждого поезда, тем меньше минимально допустимое расстояние между ними. Нами рассмотрен достаточно упрощенный вариант, когда электровозы движутся в одну сторону с одинаковой скоростью. В действительности скорость каждого электровоза меняется на всем пути следования в зависимости от сложности железнодорожной трассы, погодных условий, характера движения других составов на данном участке железной дороги и т.п.

Однако можно предварительно оценить, какой из случаев влияния для любого варианта сближения линии с железной дорогой будет наихудшим, используя данные из табл.3. Например, если величина минимально допустимого расстояния между составами окажется меньше величины, равной $0.35 \cdot l_{\text{ЛЭП}}$, то тогда наиболее опасным будет первый случай влияния, когда по участку проходит один электроподвижной состав.

Выводы

1. Исследование двух случаев влияния сети железной дороги на смежную ЛЭП (движение одного и двух составов по однопутному участку) показало, что уровень наведенного напряжения на линии электропередачи, подверженной влиянию, зависит, кроме всего прочего, от количества составов на участке железной дороги и их взаимного расположения.

2. Предварительно оценить и сравнить оба случая влияния возможно при известной средней скорости движения составов по участку и межпоездном интервале $t_{\text{мин}}$, которые определяют минимально допустимое расстояние между составами. При прочих равных условиях, если расстояние между составами не превышает 35% от полной длины ЛЭП, наихудшим будет случай влияния, когда по однопутному участку железной дороги движется один состав.

3. Чем длиннее линия электропередачи, тем выше вероятность того, что движение одного состава по участку железной дороги приведет к появлению более высокого уровня наведенного напряжения на проводах ЛЭП, в отличие от движения по данному участку двух составов, каждый из которых потребляет такую же мощность, что и одиночный состав.

Литература

1. Залесова О.В., Якубович М.В. Исследование защитного действия рельсов на однопутном участке железной дороги в зоне высокоомных грунтов // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2014. Вып. 8. С. 62-68.
2. Залесова О.В. Исследование уровня наведенного напряжения на отключенной линии электропередачи, находящейся в зоне влияния тяговой сети железной дороги переменного тока // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 1, С. 40-45.
3. Бобровников Я.Ю. Электрические железные дороги: учеб. пособие. Хабаровск: ДВГУПС, 2010. 79 с.

Сведения об авторах

Залесова Ольга Валерьевна,

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

Якубович Марина Викторовна,

научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и технологии
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к.т.н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
эл. почта: yakubovich@ien.kolasc.net.ru

УДК 621.311

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

ГЕНЕРАТОР КНЧ-ДИАПАЗОНА ДЛЯ ГЛУБИННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЭП СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аннотация

Рассмотрена возможность использования КНЧ-генератора «Энегия-2» мощностью 200 кВт, питающегося от трехфазной сети напряжением 380 В, для проведения электромагнитных зондирований с использованием в качестве антенны СпецЛЭП объекта «Зевс». Представлены результаты разработки нового КНЧ-генератора «Энергия-Зевс» мощностью до 30 кВт с питанием от двух генераторов постоянного тока. Рассмотрены структурная схема и конструкция генератора. Также приведены расчетно-теоретические обоснования выбора схемотехнического решения и элементной базы согласующего устройства продольной компенсации генератора «Энергия-Зевс».

Ключевые слова:

КНЧ-генераторы, электромагнитные зондирования, линии электропередачи, генераторы постоянного тока, согласующее устройство, продольная компенсация.

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

ELF GENERATOR FOR ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS WITH SPECIAL POWER LINE

Abstract

The possibility of using 200 kW ELF generator «Energy-2» for electromagnetic soundings with special power line used as transmitting line is considered. The generator is powered by a three-phase 380 V AC. The development of a new 30 kW ELF generator «Energy-Zevis» for the same purposes powered by two DC generators is discussed. Electric circuit and construction of the generator are described. The results of electronic circuit design and selection of electronic components of capacitive longitudinal compensation unit for «Energy-Zevis» generator are presented.

Keywords:

ultra low frequency transmitters, electromagnetic soundings, power lines, DC generators, matching unit, capacitive longitudinal compensation.

Для проведения электромагнитных зондирований с использованием в качестве антенны спецЛЭП объекта «Зевс» была проведена оценка возможности использования и необходимых доработок генераторов «Энегия-2» и «Энергия-2М». КНЧ-генератор «Энергия-2» [1] изначально был создан для работы на антенну в виде промышленной высоковольтной ЛЭП и успешно прошел натурные испытания в ходе международного эксперимента «FENICS-2009» [2]. Структура генератора приведена на рис. 1.

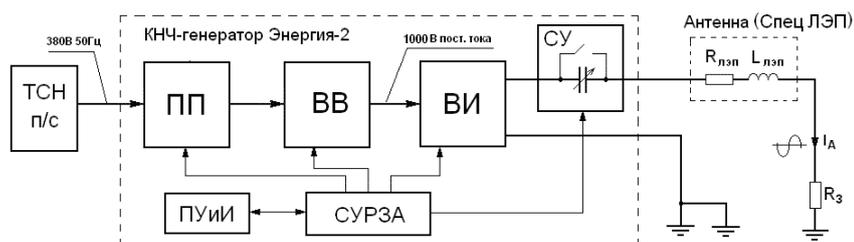


Рис. 1. Структурная схема генератора «Энергия-2»:

ТСН п/с – питающий трансформатор собственных нужд электрической подстанции; $R_{лэп}$ – активное сопротивление проводов спецЛЭП; $L_{лэп}$ – индуктивность проводов спецЛЭП; $R_з$ – сопротивление заземления дальнего конца линии; ПП – повышающий преобразователь; ВВ – высоковольтный выпрямитель; ВИ – высоковольтный инвертор; СУ – согласующее устройство; СУРЗА – схема управления, регулирования защиты и автоматики; ПУиИ – пульт управления и индикации

Выходной инвертор генератора (ВИ) выполнен по мостовой схеме на основе мощных IGBT-модулей. Синусоидальная форма тока в нагрузке формируется методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). На рабочих частотах, когда реактивное сопротивление излучающей линии начинает ограничивать силу тока в антенне, используется согласующее устройство (СУ) продольной компенсации. При работе на частотах, требующих применения СУ, на выходе инвертора формируется меандр, а синусоидальность тока в антенне обеспечивается резонансом. При этом величина емкости СУ при переходе на другую частоту генерации должна изменяться так, чтобы выполнялось соотношение:

$$2\pi f_{\Gamma} L_{\text{ЛЭП}} = \frac{1}{2\pi f_{\Gamma} C_{\text{СУ}}}. \quad (1)$$

Генератор «Энергия-2» имеет следующие основные технические характеристики:

- питание от трехфазной сети напряжением 380 В частотой 50 Гц;
- максимальная выходная мощность – 200 кВт;
- максимальный ток в нагрузке – 300 А;
- максимальное напряжение на нагрузке – 1000 В;
- максимальная выходная мощность – 200 кВт;
- рабочий диапазон частот 0.001-500 Гц.

Оценим возможность применения по выходным энергетическим характеристикам генератора «Энергия-2» при использовании в качестве антенны первой и второй линий спецЛЭП в различной конфигурации подключения. Максимальная выходная мощность развивается генератором на низших частотах, когда полное сопротивление нагрузки в виде ЛЭП соответствует сопротивлению на постоянном токе R_{DC} . В состав R_{DC} входит активное сопротивление проводов линии и сопротивления заземляющих устройств. По результатам предыдущих работ с использованием спецЛЭП были получены соответствующие значения сопротивления R_{DC} : для первой линии – 8.5 Ом, для второй линии – 11 Ом, для параллельно соединенных линий – 5.6 Ом.

Максимальная выходная мощность в нагрузке развивается при использовании параллельно соединенных линий и на максимальном выходном напряжении составляет $P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}^2 / R_{DC} = 1000^2 / 5.6 \approx 179$ кВт, что меньше максимальной мощности генератора. Таким образом, генератор «Энергия-2» может быть без ограничений использован для формирования тока в антенной системе на основе спецЛЭП. Для работы на максимально возможном токе в антенне, определяемом только параметрами линии, во всем диапазоне частот требуется создание системы компенсации индуктивности линии – согласующего устройства продольной компенсации.

Схема согласующего устройства выполняется в виде последовательно-параллельного соединения силовых конденсаторных батарей и с помощью ключей, имеющих внешнее управление, изменяет свою структуру таким образом, что емкостное сопротивление согласующего устройства на каждой рабочей частоте равно индуктивному сопротивлению антенны. Коммутация ключей может производиться как дистанционно устройствами автоматики, так и вручную персоналом.

Разработка электрической схемы согласующего устройства, состоящего из достаточно ограниченного набора типоминималов конденсаторов, но обеспечивающего высокую эффективность компенсации реактивной составляющей излучающей антенны в виде ЛЭП в широком диапазоне частот генерации, подробно рассмотрена авторами в [3]. Здесь лишь приведем схему СУ (рис.2) и краткое описание ее работы.

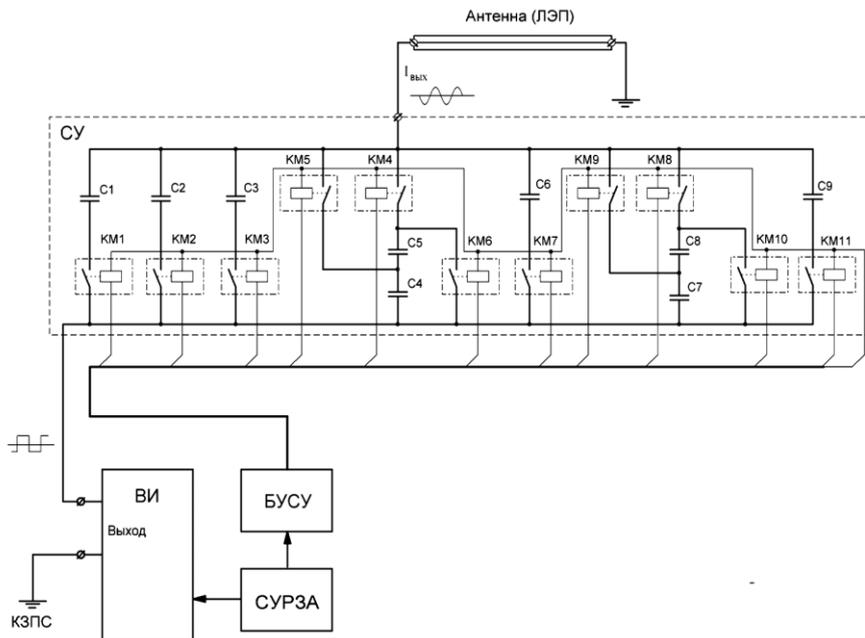


Рис.2. Функциональная схема согласующего устройства генератора «Энергия-2»:

ВИ – высоковольтный инвертор; СУ – согласующее устройство; БУСУ – блок управления согласующим устройством; СУРЗА – схема управления, регулирования, защиты и автоматики генератора «Энергия-2»; КМ1-КМ11 – магнитные контакторы

Выходной сигнал инвертора поступает на согласующее устройство продольной компенсации СУ. В состав СУ входит 9 высоковольтных конденсаторов (С1-С9) с различными номиналами емкости и 11 магнитных контакторов (КМ1-КМ11), с помощью которых конденсаторы коммутируются таким образом, чтобы обеспечить необходимую емкость СУ. Необходимая конфигурация схемы коммутации контакторов собирается автоматически при смене частоты генерации при отключенном ВИ. Логические сигналы управления контакторами формируются в блоке формирования сигналов управления (БФСУ) и далее поступают на плату управления согласующим устройством (ПУСУ), где преобразуются в аналоговые сигналы, подаваемые непосредственно на магнитные контакторы. При конфигурировании схемы СУ для формирования необходимой суммарной емкости одновременно должны включаться несколько магнитных контакторов, что приводит к возникновению в этот момент больших пусковых токов по шине питания втягивающих обмоток. Для ограничения этих токов в микропрограмму контроллера БФСУ заложен оригинальный алгоритм включения нужных контакторов с некоторой задержкой (последовательно). Такой алгоритм также обеспечивает снижение механической вибрации и акустического шума в момент конфигурирования емкости СУ.

Подробнее остановимся на выборе типов конденсаторов для практической реализации такого СУ с учетом параметров антенны – спецЛЭП. Известно, что напряжения, возникающие на конденсаторах при резонансе, значительно превосходят выходное напряжение генератора. Величину этих напряжений необходимо учитывать при выборе типов конденсаторов, используемых в СУ. Так как выходной сигнал генератора

при работе на СУ имеет форму меандра, то для действующего значения первой гармоники выходного напряжения в этом случае можно записать:

$$U_1 = \frac{1000 \times 1.27}{\sqrt{2}} \approx 900 \text{ В}, \quad (2)$$

где 1000 В – максимальное напряжение на звене постоянного тока высоковольтного инвертора генератора «Энергия-2». Зависимость первой гармоники тока через СУ от частоты может быть найдена как:

$$I_1(\omega) = U_1 / R(\omega), \quad (3)$$

где $R(\omega) = \text{Re}[Z(\omega)]$ – активная составляющая полного сопротивления линии спецЛЭП.

Полное сопротивление $Z(\omega)$ линии в общем виде может быть найдено:

$$Z(\omega) = l_{\text{эф}} \cdot (Z_{\text{аицад}}(\omega) + Z_{\text{эф}}(\omega) + Z_{\text{тоиа}}(\omega)) + Z_{\text{сг}},$$

где $l_{\text{лин}}$ – длина излучающей линии; $Z_{\text{возвр}}(\omega)$ – погонное сопротивление возвратному току в земле; $Z_{\text{лин}}(\omega)$ – погонное реактивное сопротивление линии с учетом высоты подвеса провода; $Z_{\text{пров}}(\omega)$ – реактивное сопротивление проводов линии; $Z_{\text{зг}}$ – суммарное сопротивление заземляющих устройств. Методика расчета полного сопротивления нулевой последовательности ЛЭП представлена в [3]. На рис.3. приведены результаты расчета частотной зависимости активной составляющей полного сопротивления первой и второй линии, а также двух параллельно соединенных линий спецЛЭП.

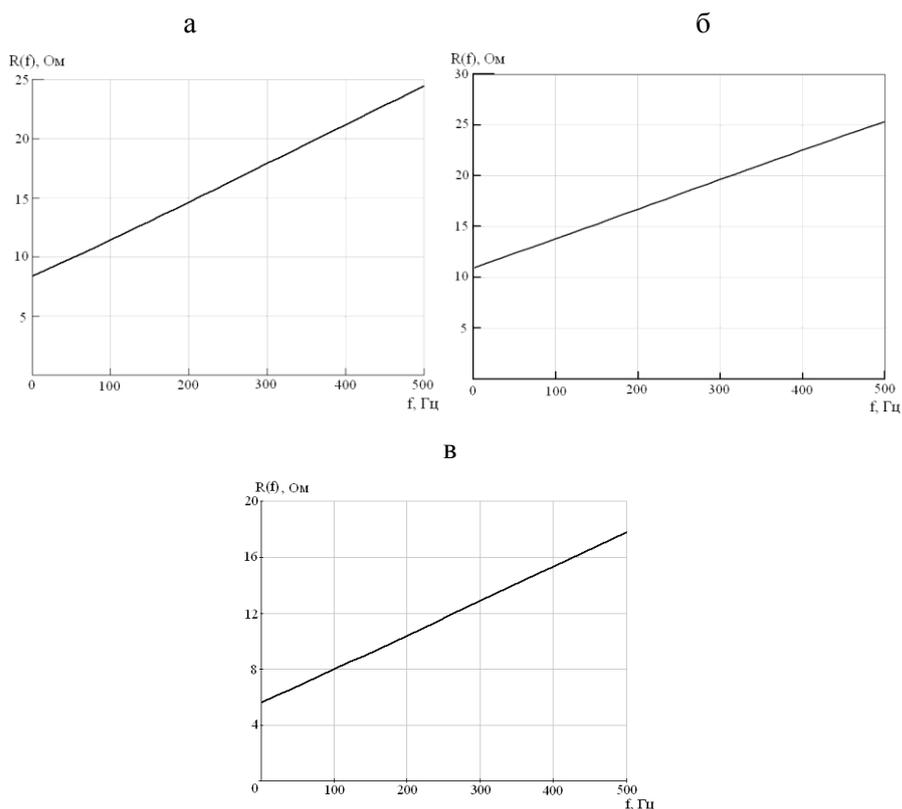


Рис.3. Зависимость активной составляющей полного сопротивления первой (а), второй (б) линии и двух параллельно соединенных линий (в) спецЛЭП от частоты

Действующее значение напряжения на выводах конденсаторов СУ:

$$U_{\text{СУ}}(f) = \frac{I_1(f)}{2\pi f C_{\text{СУ}}(f)}, \quad (5)$$

где $C_{\text{СУ}}(f)$ – значение емкости СУ, необходимой для выполнения условия согласования (резонанса) на частоте генерации f .

Зависимость напряжения на конденсаторах СУ от частоты приведена на рис.4. Для экономии места приведены зависимости только для случая работы генератора на первую и вторую линии спецЛЭП по отдельности. Из графиков видно, что при работе на частоте 500 Гц напряжение на конденсаторах СУ может составлять величину 4-5 кВ, что значительно превышает выходное напряжение генератора. Это необходимо принимать во внимание при выборе типов конденсаторов для СУ.

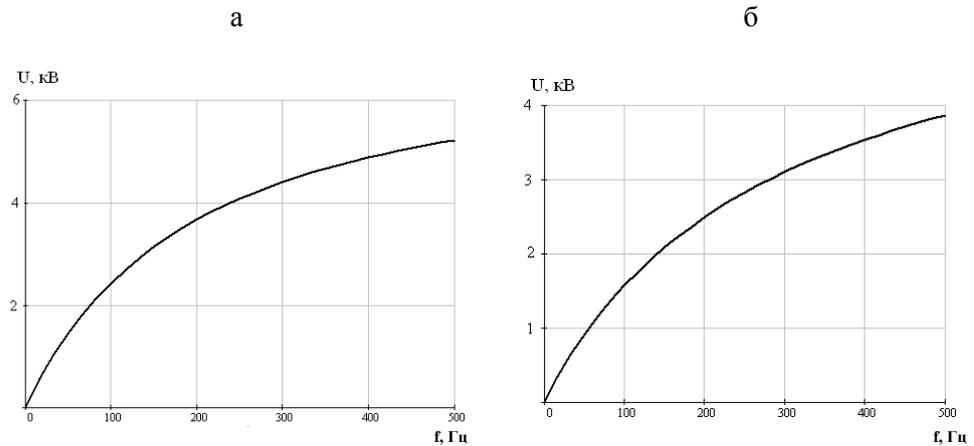


Рис.4. Зависимость действующего значения напряжения на выводах конденсаторов СУ от частоты генерации при использовании в качестве антенны линии 1 (а) и линии 2 (б) спецЛЭП при выходном напряжении генератора 1000 В

Другим параметром, который должен учитываться при выборе типа конденсаторов, является номинальная суммарная мощность СУ, выраженная в кВар: $Q_{\text{НО}}(f) = U_{\text{НО}}(f) \cdot I_1(f)$. На рис.5 приведена частотная зависимость требуемой реактивной мощности СУ при работе генератора на первую и вторую линии спецЛЭП в режиме максимальной выходной мощности.

Третий параметр, учитываемый при выборе элементной базы СУ, – допустимая сила тока через конденсатор, которая может быть вычислена через допустимое рабочее напряжение конденсатора и его реактивное сопротивление на данной частоте согласования.

Так как все перечисленные параметры конденсаторов СУ (емкость, мощность, допустимое напряжение и сила тока) связаны между собой, то выбор конкретных типов конденсаторов СУ достаточно сложная задача. Подробнее вопрос применения в разработанном СУ (рис.2) конкретных типов конденсаторов рассмотрен в [3], здесь лишь приведем их типонаименования: С1 – КЭПФ-6.3-200-2УХЛ1 – 16.47 (16.54) мкФ; С2 – КЭПФ-4.0-300-2УХЛ1 – 30 (30.2) мкФ; С3 – КЭПФ-4.0-150-2УХЛ1 – 60 (59.75) мкФ; С4, С5 – КЭП2-2.1-200-2У1 – 144 (146.5, 145.9) мкФ; С6 – К78-42-5000В – 400 (401.6) мкФ;

С7, С8 – К78-42-2500В – 1100 (1092, 1102) мкФ; С9 – К78-42-2500В – 3000 (3290) мкФ. Перед скобками приведены номинальные значения емкостей, заявленные производителем, а в скобках даны реальные значения, измеренные с помощью LC-метра. Реальные значения емкости конденсаторов нужны для более точного расчета необходимой суммарной компенсирующей емкости на конкретной частоте генерации и тем самым обеспечения лучшей компенсации индуктивности линии и увеличения силы тока в антенне.

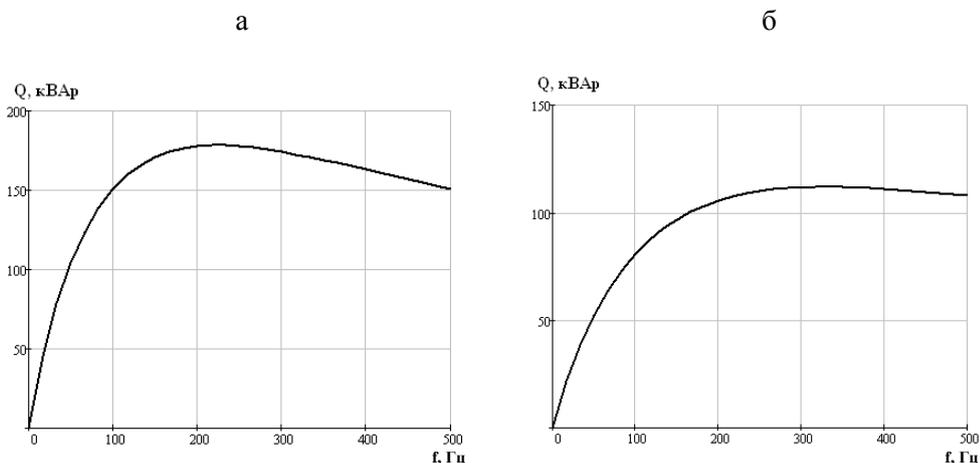


Рис.5. Зависимость требуемой реактивной мощности СУ от частоты генерации при использовании в качестве антенны линии 1 (а) и линии 2 (б) спецЛЭП

Внешний вид действующего макета разработанного СУ приведен на рис.6б. Для сравнения на рис.6а приведена фотография внешнего СУ, использовавшегося в генераторе «Энергия-2» в ходе эксперимента «FENICS-2009».

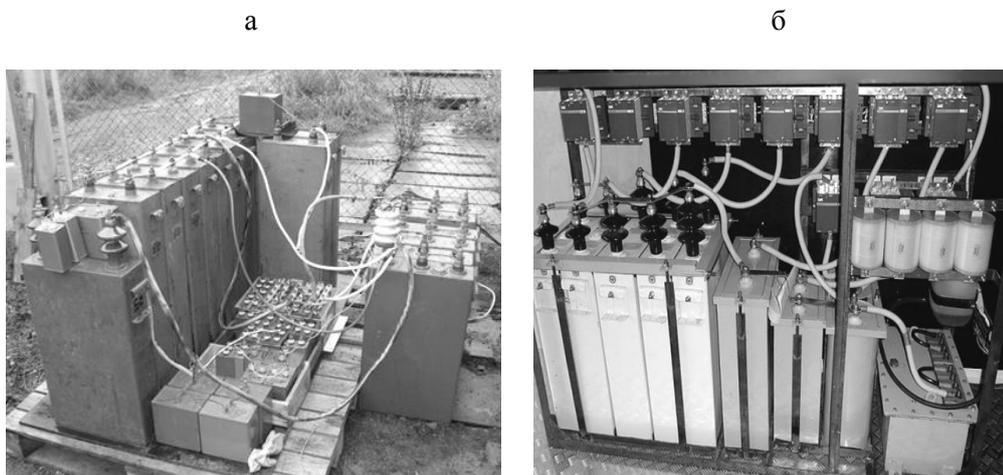


Рис.6. Внешний вид согласующего устройства генератора «Энергия-2», использовавшегося ранее (а) и вновь разработанного (б)

В таблице 1 приведен проектный режим работы генератора «Энергия-2» на антенну спецЛЭП в 2013 г. Частоты с 5-й по 14-ю требуют применения согласующего устройства. В табл.2 приведены расчетные емкости СУ и реальные емкости, формируемые коммутацией конденсаторов, входящих в СУ, для различных частот и разных вариантов конфигурации излучающей антенны при работе:

- на первую линию спецЛЭП ($L_A=0.1$ Гн);
- на вторую линию спецЛЭП ($L_A=0.115$ Гн);
- на параллельно соединенные линии ($L_A=0.073$ Гн).

Таблица 1

Проектный режим работы генератора «Энергия-2» на антенну спецЛЭП

№ частоты	Частота, Гц	Длительность, мин	Форма сигнала	Компенсация
1	0.192	20	Меандр	Нет
2	0.942	10	То же	То же
3	1.942	5	»	»
4	3.822	5	Ближе к меандру	»
5	6.422	4	Синус	»
6	9.422	3	То же	»
7	13.82	3	»	»
8	19.42	3	»	»
9	38.22	3	»	»
10	64.22	3	»	»
11	94.22	3	»	»
12	194.2	3	»	»
13	332.2	3	»	»
14	533.2	3	»	»

Таблица 2

Расчетная и реальная емкость СУ генератора «Энергия-2» на различных частотах при использовании разных вариантов подключения линий спецЛЭП

Антенна частота, Гц	Первая линия		Вторая линия		Параллельно соединенные линии	
	расчетн. $C_{СУ}$, мкФ	реальн. $C_{СУ}$, мкФ	расчетн. $C_{СУ}$, мкФ	реальн. $C_{СУ}$, мкФ	расчетн. $C_{СУ}$, мкФ	реальн. $C_{СУ}$, мкФ
6.42	5584	5582.4	5341	5346.9	8414	-
9.42	2594	2600	2481	2496	3909	3902.4
13.82	1206	1204	1153	1154.4	1817	1812.5
19.42	610.6	606.4	584	580	920.1	918.9
38.22	157.6	160.4	150	148	237.54	234.4
64.22	55.8	56.4	53.4	56.4	84.14	86.4
94.22	25.94	30	24.8	30	39.09	46.5
194.2	6.1	-	5.8	-	9.29	-
332.2	2.0	-	1.99	-	3.14	-
533.2	0.81	-	0.77	-	1.22	-

Как видно из табл.2, при использовании линий спецЛЭП в различной конфигурации компенсация возможна на частотах от 5-й (6-й для параллельного соединения линий) до 11-й. Верхние три частоты требуют введения дополнительных конденсаторов малой емкости. В целом можно заключить, что разработанное автоматизированное СУ продольной компенсации для генератора «Энергия-2» обеспечивает эффективную компенсацию реактивной составляющей излучающей антенны (линий спецЛЭП, подключенных в различной конфигурации) в ограниченном диапазоне (6-94 Гц) рабочих частот.

Для электромагнитных зондирований с использованием в качестве антенны спецЛЭП объекта «Зевс» был также разработан КНЧ-генератор с автономным питанием, получивший обозначение «Энергия-Зевс». Генератор разрабатывался на базе двухканального КНЧ-генератора «Энергия-2М» мощностью до 29 кВт, предназначенного для подачи сигналов одинаковой частоты, но разной амплитуды и фазы в две ортогональные заземленные антенны с целью получения управляемой диаграммы направленности. Принцип действия и конструкционное исполнение генератора «Энергия-2М» подробно изложены в [4]. При разработке генератора «Энергия-Зевс» учитывалось, что нагрузкой генератора будет одна из линий спецЛЭП, а также возможна работа на параллельно соединенные линии спецЛЭП.

Функциональная схема генератора «Энергия-Зевс» приведена на рис.7. Высоковольтный инвертор (ИНВ) состоит из двух идентичных инверторов (канала А и канала В), имеющих общую схему управления. В состав каждого инвертора входят два силовых полумостовых IGBT-модуля, схемы драйверов управления IGBT-модулями (ДРВ), конденсаторы звена постоянного тока ($C_{инвА}$, $C_{инвВ}$), дроссель выходного фильтра НЧ ($Lф$), а также датчики выходного тока (ДТ А, ДТ В) и напряжения, шины звена постоянного тока (ДН А, ДН В). Подача напряжения с выходов генераторов постоянного тока (ГПТ) на входы инвертора осуществляется магнитным контактором КМ. СОП – схема ограничения перенапряжений – задействована для быстрого разряда конденсаторов ($C_{ш}$) звена постоянного тока инвертора канала А.

Так как выходная мощность генератора «Энергия-Зевс» ограничена суммарной мощностью питающих генераторов постоянного тока П-72, составляющей 29 кВт, в инверторе задействован только один канал – канал А. Силовая часть канала В не задействована. В генераторе используется система управления регулирования защиты и автоматики (СУРЗА) от генератора «Энергия-2М» с измененной программой управления центрального микроконтроллера.

В качестве силового источника питания используются два автономных генератора постоянного тока (ГПТ-1, ГПТ-2) типа П-72 электроразведочной станции ЭРС-67 выходной мощностью до 14.5 кВт и напряжением до 500 В каждый. Разработана схема коммутации выходов ГПТ на основе ключа SA1, позволяющая реализовать одну из схем соединения ГПТ для питания звена постоянного тока высоковольтного инвертора. При верхнем положении SA1 на рис.7 генераторы ГПТ-1 и ГПТ-2 соединены параллельно и обеспечивают выходное напряжение до 500 В и ток до 60 А. При нижнем положении SA1 генераторы включаются последовательно и формируют на звене постоянного тока инвертора напряжение до 1000 В, обеспечивая силу тока до 30 А. Выбор схемы подключения ГПТ определяется частотой генерации.

Выше, на рис.3, приведены зависимости активной составляющей $R(f)$ полного сопротивления излучающей линии $Z(f)$ спецЛЭП от частоты. В состав $R(f)$ входят сопротивления ближнего и дальнего заземления линии, сопротивление проводов линии с учетом взаимовлияния и высоты подвеса, сопротивление возвратному току.

Оценим мощность, потребляемую генератором «Энергия-Зевс» от ГПТ, для каждого из трех возможных вариантов подключения линий спецЛЭП. При работе на вторую линию, имеющую сопротивление на постоянном токе 11 Ом, потребляемая от ГПТ мощность на нижней частоте составит величину 22.9 кВт, что меньше суммарной мощности питающих генераторов, и при увеличении частоты будет уменьшаться. Следовательно, на вторую линию во всем частотном диапазоне можно работать без ограничения выходного напряжения ГПТ. Первая линия имеет

сопротивление на постоянном токе 8.5 Ом, мощность, потребляемая от ГПТ, на нижней частоте составит 29.8 кВт, что близко к допустимой суммарной мощности ГПТ (29 кВт). В целом можно заключить, что работа на первую линию во всем частотном диапазоне также может проходить без ограничения выходного напряжения ГПТ. При параллельном соединении линий из-за уменьшения $R(f)$ в диапазоне частот от 0 до 130 Гц необходимо ограничивать выходное напряжение параллельно включенных генераторов постоянного тока таким образом, чтобы отбираемая от них мощность не превышала 29 кВт.

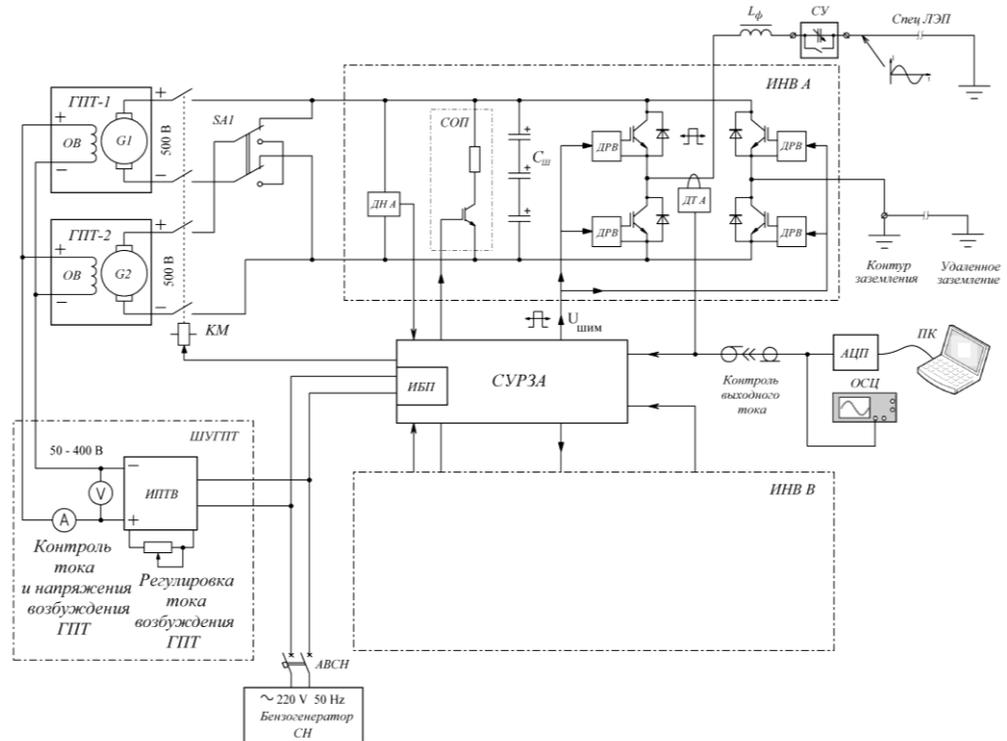


Рис. 7. Функциональная схема генератора «Энергия-Зевс»:

АВСН – автоматический выключатель собственных нужд; ГПТ-1, ГПТ-2 – генераторы постоянного тока; ШУГПТ – шкаф управления генераторами постоянного тока; ИПТВ – источник постоянного тока возбуждения ГПТ; ОВ – обмотка возбуждения; КМ – контактор магнитный; ИНВ – инвертор; СОП – схема ограничения перенапряжений; $C_{ш}$ – конденсаторы звена постоянного тока инвертора; ДРВ – драйверы управления IGBT-модулями; ДН А – датчик напряжения канала А; ДТ А – датчик тока канала А; $L_{ф}$ – дроссель выходного фильтра НЧ; СУ – согласующее устройство; СУРЗА – схема управления, регулирования, защиты и автоматики; ИБП – многоканальный импульсный блок питания; АЦП – внешний аналогово-цифровой преобразователь; ОСЦ – осциллограф; ПК – портативный компьютер

Рассмотрим необходимую для максимальной отдачи энергии в нагрузку во всем частотном диапазоне конфигурацию соединения ГПТ. Расчетные графики зависимости тока (амплитудное значение) в нагрузке от частоты при работе на линию 1 (а) и линию 2 (б) и на две линии, соединенные в параллель (в), приведены на рис.8. Необходимо отметить, что все приведенные ниже значения и зависимости для частот выше 14 Гц рассчитаны с использованием СУ и соответствуют режиму резонанса, когда потребляемая от ГПТ мощность является чисто активной.

При работе на первую линию на частоте 94.22 Гц ток, потребляемый от параллельно соединенных ГПТ, составит 31.4 А, а на частоте 194.2 Гц он падает до 24 А, следовательно, на частоте 194.2 Гц и выше необходимо переходить на режим с последовательным соединением ГПТ и ограничением их выходной мощности по току до 30 А регулировкой оборотов приводящего двигателя.

При работе на вторую линию ток, потребляемый от ГПТ, уже на частоте 38.22 Гц составит величину 29.4 А, соответственно, переходить на последовательное соединение ГПТ при работе на вторую линию необходимо на частотах от 38.22 Гц и выше.

При работе генератора на нагрузку в виде параллельно соединенных линий спецЛЭП на частотах до 400 Гц питание инвертора осуществляется от параллельно соединенных ГПТ (участок 1 на рис.8в). Причем до частоты 130 Гц работа осуществляется с ограничением выходного напряжения ГПТ регулировкой оборотов приводящего двигателя таким образом, чтобы потребляемая от генераторов мощность не превышала 29 кВт, а после – на максимальном выходном напряжении. На частотах выше 400 Гц ГПТ включаются последовательно (участок 2 на рис.8в).

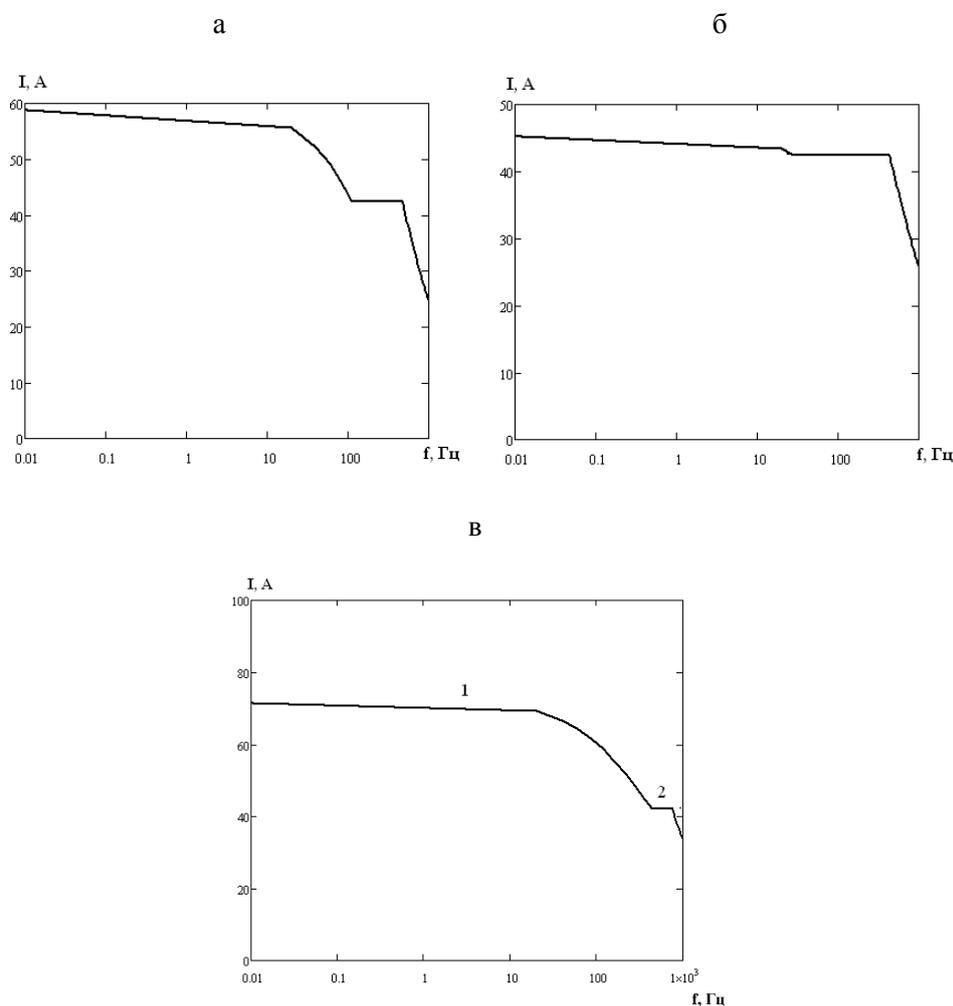


Рис.8. Расчетные зависимости амплитудного значения тока в нагрузке от частоты при работе генератора «Энергия-Зевс» на линию 1 (а), линию 2 (б) и параллельно соединенные линии 1 и 2 (в) спецЛЭП

Внешний вид стойки высоковольтного инвертора и размещение основных блоков генератора «Энергия-Зевс» в кунге автомашины приведены на рис.9 и 10.

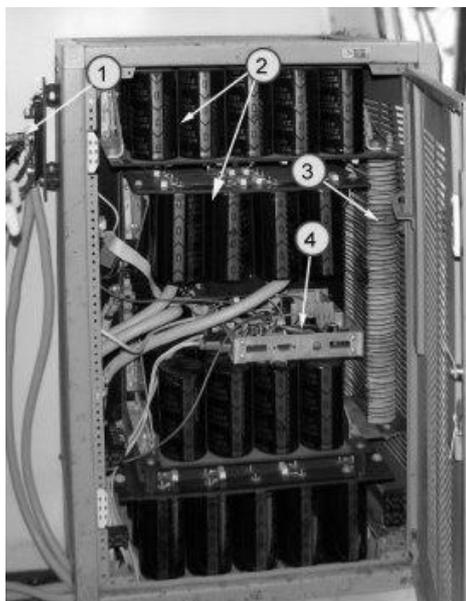


Рис.9. Внешний вид стойки инвертора с открытой дверцей:

1 – переключатель схемы соединения генераторов постоянного тока; 2 – батарея конденсаторов звена постоянного тока инвертора; 3 – гасящий резистор схемы ограничения перенапряжений; 4 – плата схемы управления, регулирования, защиты и автоматики

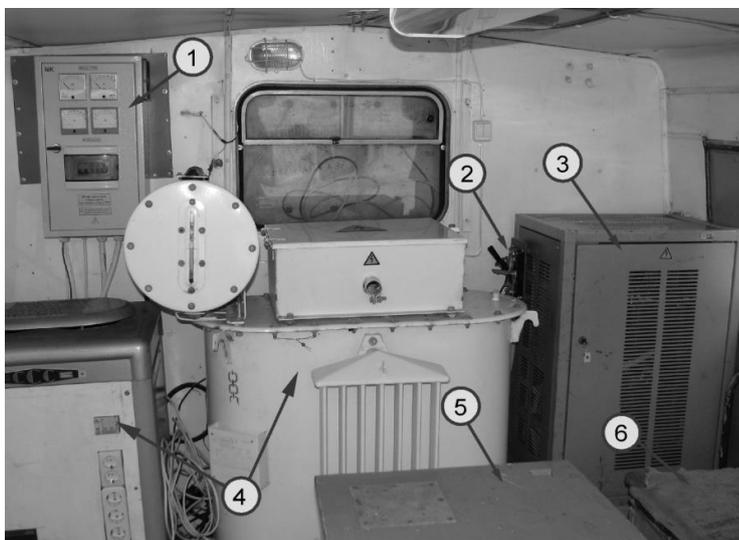


Рис.10. Внешний вид блоков генератора «Энергия-Зевс»:

1 – шкаф управления генераторами постоянного тока (ШУГПТ); 2 – переключатель схемы соединения ГПТ; 3 – шкаф инвертора; 4 – неиспользуемые блоки генератора «Энергия-2М»; 5, 6 – стол и сиденье персонала

После проведения расчетно-теоретических работ был выполнен проект электрической схемы согласующего устройства генератора «Энергия-Зевс», состоящего из ограниченного набора типономиналов конденсаторов, но обеспечивающего высокую эффективность компенсации реактивной составляющей излучающей антенны в диапазоне частот генерации до 533 Гц. Схема СУ генератора «Энергия-Зевс» приведена на рис.11. В состав СУ входит 24 высоковольтных конденсатора (С1-С24) с различными номиналами емкости и 14 перемычек (Х1-Х14), с помощью которых конденсаторы коммутируются таким образом, чтобы обеспечить необходимую емкость СУ для компенсации индуктивности линии спецЛЭП во всем диапазоне дискретных частот генерации.

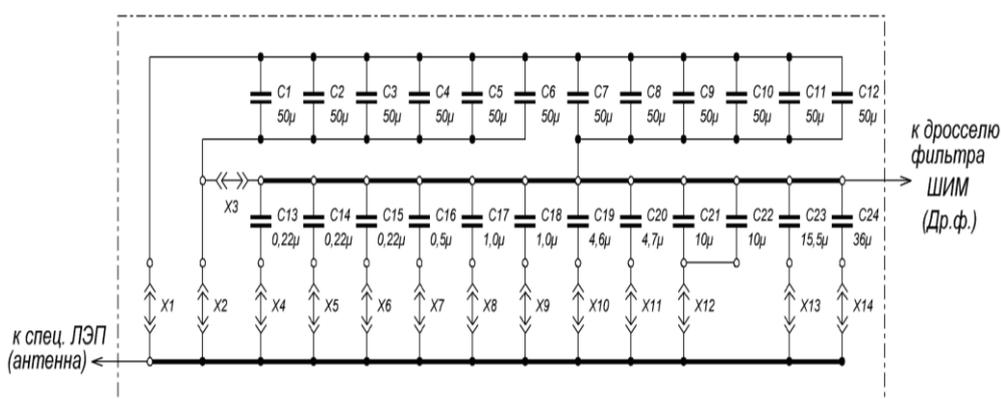


Рис.11. Принципиальная схема СУ генератора «Энергия-Зевс»:
 ЛЭП – линия электропередачи; Х1-Х14 – разъемные перемычки;
 С1-С24 – конденсаторы СУ; Др.ф. – дроссель фильтра ШИМ

Как уже отмечалось выше, при обеспечении полной компенсации индуктивности линий спецЛЭП выходное напряжение СУ генератора на максимальной рабочей частоте может достигать нескольких киловольт, что учитывалось при выборе типов конденсаторов и их допустимого рабочего напряжения. Одновременное соединение перемычек Х2 и Х3 замыкает СУ, при этом антенна подключается через фильтрующий дроссель непосредственно к выходу инвертора генератора. Такое подключение применяется на частотах ниже 19.42 Гц, когда синусоидальность формы тока в антенне обеспечивается широтно-импульсной модуляцией.

Проектный режим работы генератора «Энергия-Зевс» на антенну спецЛЭП соответствует приведенному в табл.1. В табл.3 приведены расчетные емкости СУ и реальные емкости, формируемые коммутацией конденсаторов, входящих в СУ, для различных частот и разных вариантов конфигурации излучающей антенны. Как видно из табл.3, СУ генератора «Энергия-Зевс» позволяет компенсировать индуктивность линий спецЛЭП в любой конфигурации подключения во всем диапазоне частот.

Расчетная и реальная емкость СУ генератора «Энергия-Зевс» на различных частотах при использовании разных вариантов подключения линий спецЛЭП

Антенна	Первая линия		Вторая линия		Параллельно соединенные линии	
	расчетн. C _{СУ} , мкФ	реальн. C _{СУ} , мкФ	расчетн. C _{СУ} , мкФ	реальн. C _{СУ} , мкФ	расчетн. C _{СУ} , мкФ	реальн. C _{СУ} , мкФ
19.42	610.6	610	584	600	920.066	920
38.22	157.6	159	150	150	237.54	237
64.22	55.8	56	53.4	56	84.135	84
94.22	25.94	26	24.8	25	39.087	39
194.2	6.1	5.9	5.8	5.7	9.199	9.2
332.2	2.0	2	1.99	2	3.144	3.144
533.2	0.81	0.72	0.77	0.72	1.22	1.22
19.42	610.6	610	584	600	920.066	920
38.22	157.6	159	150	150	237.54	237
64.22	55.8	56	53.4	56	84.135	84

При оценке возможности применения генераторов «Энегия-2» и «Энергия-Зевс» для проведения электромагнитных зондирований с использованием в качестве антенны спецЛЭП объекта «Зевс» можно заключить.

1. Выходная мощность 200 кВт генератора «Энегия-2», питающегося от трехфазной сети напряжением 380 В, позволяет работать на нагрузку в виде каждой из линий спецЛЭП по отдельности и на две линии, соединенные параллельно на максимальном выходном напряжении (1000 В). При этом во всем частотном диапазоне (0.001-500 Гц) ток в антенне ограничивается только сопротивлением излучающего контура. В то же время генератор «Энегия-2» требует наличия питающего трансформатора соответствующей мощности и прокладки силового кабеля, а диапазон конфигурируемой емкости ранее разработанного автоматизированного СУ не перекрывает весь диапазон частот генерации.

2. Разработанный генератор «Энергия-Зевс» обладает большей автономностью, чем генератор «Энегия-2», так как не требует прокладки питающего кабеля и может быть оперативно размещен в месте, удобном для подключения к любой из линий спецЛЭП. Согласующее устройство генератора позволяет скомпенсировать индуктивность линий спецЛЭП при работе на каждую из линий в отдельности и на две линии, соединенные в параллель, в диапазоне частот 19.42-533 Гц. Использование на нижних и верхних частотах различной схемы соединения генераторов постоянного тока, питающих выходной инвертор генератора, позволяет работать на первую и вторую линии спецЛЭП без ограничения выходного напряжения практически во всем частотном диапазоне, при этом ток в антенне ограничивается только параметрами линии. В то же время при работе генератора «Энергия-Зевс» на две параллельно соединенные линии спецЛЭП ток в антенне ограничивается суммарной мощностью питающих генераторов постоянного тока.

Литература

1. Колобов В.В., Баранник М.Б., Жамалетдинов А.А. Генераторно-измерительный комплекс «Энергия» для электромагнитного зондирования литосферы и мониторинга сейсмоактивных зон. СПб.: СОЛЮ, 2013. 240 с.

2. Глубинные электромагнитные зондирования литосферы восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита в поле мощных контролируемых источников и промышленных ЛЭП (эксперимент «FENICS») / А.А.Жамалетдинов, А.Н.Шевцов, Т.Г.Короткова, Ю.А.Копытенко, В.С.Исмагилов, М.С.Петрищев, Б.В.Ефимов, М.Б.Баранник, В.В.Колобов, П.И.Прокопчук, М.Ю.Смирнов, С.А.Вагин, М.И.Пертель, Е.Д.Терещенко, А.Н.Васильев, В.Ф.Григорьев, М.Б.Гохберг, В.И.Трофимчик, Ю.М.Ямпольский, А.В.Колосков, А.В.Федоров, Т.Корья // Физика Земли. 2011. № 1. С. 4-26.
3. Разработка согласующего устройства стационарного источника электромагнитного излучения экстремально низкочастотного диапазона / Е.Д.Терещенко, М.Б.Баранник, В.Ф.Григорьев, В.В.Ивонин, В.В.Колобов, А.Н.Миличенко, П.И.Прокопчук, В.Н.Селиванов // Труды КНЦ РАН. 2012. Т. 4, № 1. С. 68-77.
4. Генераторно-измерительный комплекс направленного действия «Энергия-2М» для сейсмического мониторинга и зондирования рудных объектов / М.Б.Баранник, В.В.Колобов, А.Н.Шевцов, А.А.Жамалетдинов // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48, № 1. С. 1-22.

Сведения об авторах

Колобов Виталий Валентинович,

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

Баранник Максим Борисович,

ведущий инженер лаборатории электроэнергетики и электротехнологии
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
эл. почта: maxbar@ien.kolasc.net.ru

Прокопчук Павел Иванович,

ведущий инженер лаборатории электроэнергетики и электротехнологии
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
эл. почта: finsoft@mail.ru

УДК 621.311

Д.В.Куклин

СРАВНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЕРХНЕЙ ФАЗЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ ПРИ УДАРЕ МОЛНИИ В ЛИНИЮ С ГРОЗОТРОСОМ*

Аннотация

Представлены результаты расчетов напряжений на верхней фазе опоры линии с грозотросом и различными конструкциями заземлителей для разных параметров грунта.

Ключевые слова:

грозовые перенапряжения, опора линии электропередачи, заземлитель, метод конечных разностей во временной области.

D.V.Kuklin

COMPARISON OF VOLTAGES ON UPPER PHASE FOR DIFFERENT GROUNDINGS IN CASE LIGHTNING STRIKES TRANSMISSION LINE WITH GROUND WIRE

Abstract

The article presents calculation results of voltage on upper phase of transmission line tower with ground wire for different grounding constructions and soil parameters.

Keywords:

lightning overvoltages, transmission line tower, grounding, finite-difference time-domain method.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Мурманской области (проект № 14-08-98803р_север_а).

В ПУЭ верхний предел допустимых сопротивлений заземлений опор линий электропередачи рассчитывается через значение удельного сопротивления грунта [1]. Исходя из предложенного в ПУЭ способа расчета, для обеспечения необходимого сопротивления заземления в районах с высоким значением удельного сопротивления грунта требуется сооружение заземлителей с размерами, экономическая оправданность которых сомнительна. Так, согласно требованиям, общая длина проводников лучевого заземлителя может значительно превысить длину пролета. Из-за отсутствия ссылок на литературу в ПУЭ источник этих требований неясен.

В зарубежных работах можно найти методики, в которых сопротивление заземления не привязано к значению удельного сопротивления грунта, а лишь является одним из факторов, влияющих на более важные показатели: цену на монтаж заземлителей и число отключений линии [2], которые и являются основными при выборе заземлителей.

Такой подход особенно важен в районах с высоким удельным сопротивлением грунтов, так как в этом случае больше диапазон возможных значений сопротивлений опор (и, соответственно, размеров заземлителей), вследствие чего выбор целесообразных конструкций заземлителей более сложен.

Для обеспечения подобного подхода важно было бы знать, какие конструкции заземлителей более эффективны и насколько. Чтобы понять, что оказывает влияние в большей степени, а что в меньшей, полезно рассмотреть множество случаев с различными вариантами заземлителей, опор, мест удара молнии, грунтов и пр., учитывая при этом волновые процессы (по причине большей точности). В данной статье будет рассмотрен случай удара молнии в вершину опоры для линии с грозотросом.

В качестве расчетного метода используется метод конечных разностей во временной области [3], для которого относительно недавно появился метод, позволяющий моделировать произвольно ориентированные проводники, диаметр которых не задается размером расчетной сетки [4]. С помощью данного метода можно моделировать заземлители и опоры любой конструкции. Этот метод был использован в данной статье, что позволило провести расчеты с лучевыми заземлителями.

Расчеты проведены для однородного грунта, а также для случая, когда поражаемая опора находится на участке с более низким удельным сопротивлением. Случай удара молнии в грозотрос не рассмотрен.

Участок модели показан на рис.1, из которого видно, что в модели использована упрощенная модель опоры, не включающая всех подробностей конструкции, которые, однако, могут быть учтены в дальнейшем. Основные параметры опоры близки к параметрам опоры ПС110-10.

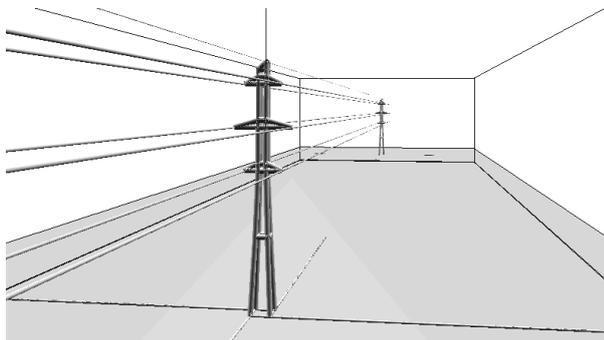


Рис.1. Участок модели

Размер расчетной сетки – 0.5 м. Поглощающие граничные условия – CPML [3]. Длина пролета – 300 м. Диаметр проводников опоры – 0.1 м. Диаметр грозотроса – 10 мм. Диаметр фазных проводов – 20 мм. Диаметр лучей заземлителя – 12 мм. Амплитуда тока для случая с фронтом 1 мкс – 30 кА, время полуспада – 200 мкс. Амплитуда тока для случая с фронтом 0.25 мкс – 15 кА (хотя тот факт, что токи последующих компонентов в среднем примерно в 2 раза меньше, не означает, что для конкретного разряда ток последующего компонента окажется меньше тока первого, так как нет данных корреляции между токами компонентов), время полуспада – 100 мкс. Фундаменты опор не моделировались. Канал молнии смоделирован в виде вертикального проводника диаметром 0.1 м с идеальным источником тока у основания. Проводник канала молнии, а также фазные провода доходят до границы области вычислений, что обычно применяется для моделирования проводников бесконечной длины.

Важно отметить, что к представленным результатам расчетов нужно относиться осторожно, так как использованный метод моделирования проводников нужно изучить более тщательно. Несмотря на то что данный метод был проверен для моделирования проводников конечной длины, примененный в статье способ моделирования проводников бесконечной длины, подходящий для других методов, может оказаться неточным для данного метода. Также в связи с особенностями метода для измерения разности потенциалов приходится располагать фазные провода близко к траверсам опоры (но, конечно, без электрического контакта). В том числе здесь учтены только две соседние опоры, в реальном же случае будут влиять и другие опоры, и напряжения будут отличаться от рассчитанных примерно после четвертой микросекунды при сохранении той же длины пролета. То есть нужно учитывать, что более точные расчеты могут скорректировать сделанные выводы.

В случае с однородным грунтом удельное сопротивление грунта принято равным 2000 Ом·м, относительная диэлектрическая проницаемость – 7. Для случая с неоднородным грунтом средняя опора находится на участке с более низким удельным сопротивлением, равным 500 Ом·м (рис.2), относительная диэлектрическая проницаемость – 12.

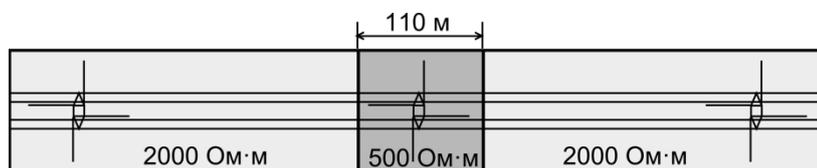


Рис.2. Параметры грунта для рассмотренного случая с неоднородным грунтом. Пропорции не соблюдены

Результаты расчетов для однородного грунта представлены на рис.3 и 4. По характеру напряжения схожи с теми, что были получены ранее для похожей модели [5]. Из результатов расчетов видно, что напряжение для четырехлучевого заземлителя для большей части рассмотренного временного промежутка ниже напряжения для других заземлителей, а напряжение для шестилучевого заземлителя ниже напряжения для восьмилучевого заземлителя практически на всем промежутке. Таким образом, по крайней мере для данной конфигурации и данного грунта, число лучей больше четырех-шести стоит увеличивать только в том случае, если это более удобно с точки зрения монтажа.

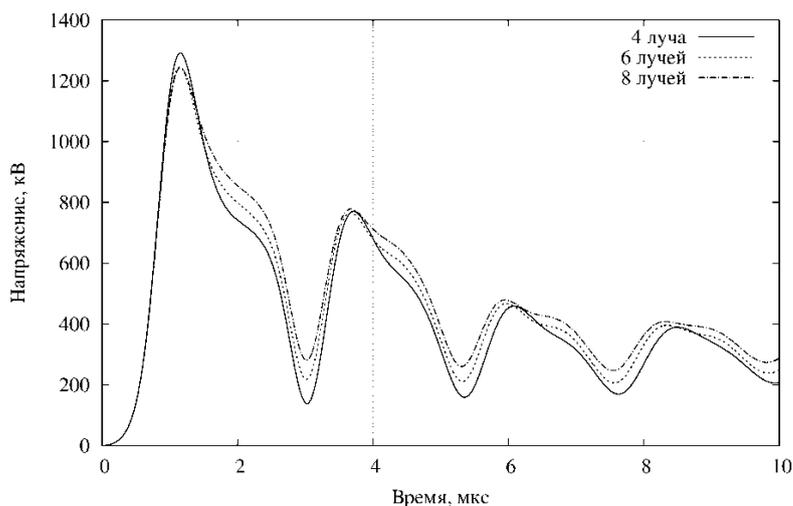


Рис.3. Напряжение на верхней фазе для импульса тока с фронтом 1 мкс. Однородный грунт

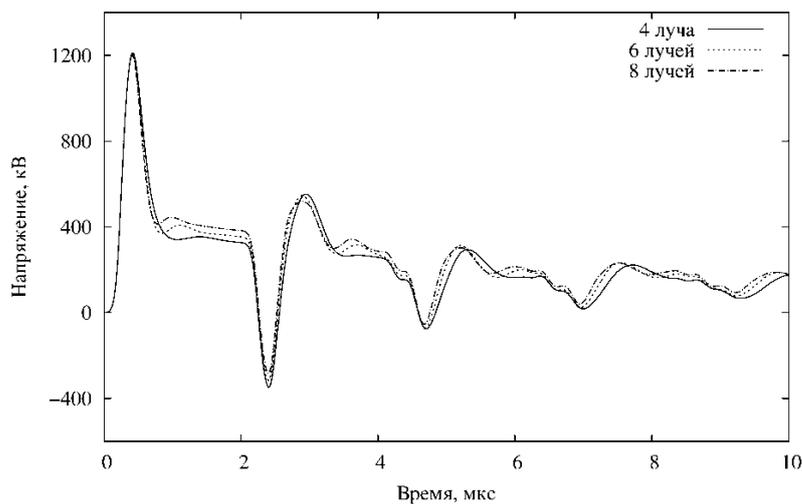


Рис.4. Напряжение на верхней фазе для импульса тока с фронтом 0.25 мкс. Однородный грунт

Результаты расчетов для неоднородного грунта представлены на рис.5 и 6. Область с относительно низким удельным сопротивлением стала определяющей для значений напряжений. Второе замечание: при относительно низком удельном сопротивлении разница между вариантами заземлителей мала (при сравнении с первым индуктивным всплеском напряжения), следовательно, в таком случае число лучей имеет меньшее значение, чем при большем сопротивлении грунта. Конечно, не стоит автоматически распространять данные результаты и на все случаи с похожим (или меньшим) удельным сопротивлением грунта, но для схожих конструкций опор и размеров заземлителей можно ожидать близкие результаты.

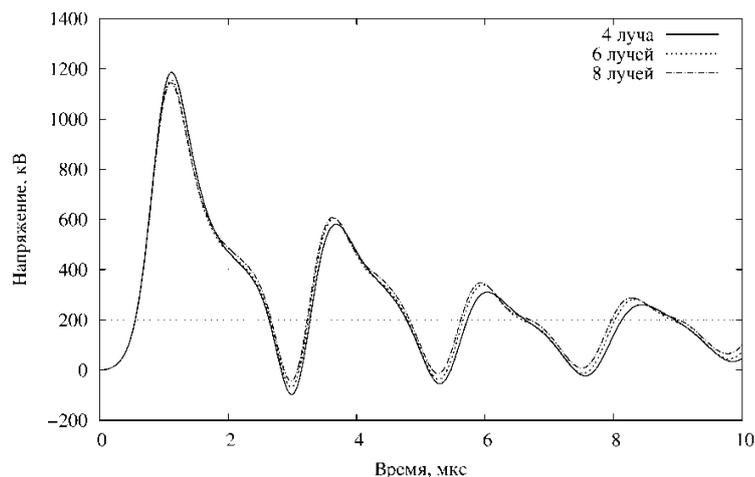


Рис.5. Напряжение на верхней фазе для импульса тока с фронтом 1 мкс. Неоднородный грунт

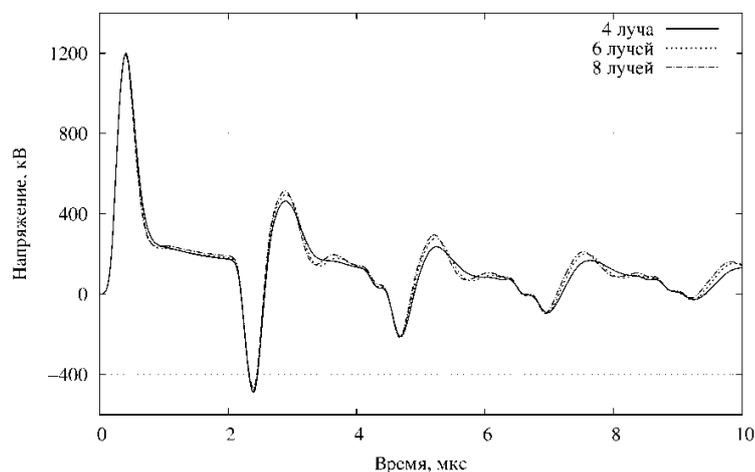


Рис.6. Напряжение на верхней фазе для импульса тока с фронтом 0.25 мкс. Неоднородный грунт

Также были проведены расчеты для грунта с удельным сопротивлением 10000 Ом·м. На рис.7 и 8 представлены результаты этих расчетов, а также даны для сравнения результаты с грунтом 2000 Ом·м. Характер напряжений для разных грунтов различается сильно. Можно заметить, что в случае с большим удельным сопротивлением при фронте 1 мкс разница между напряжениями для разного числа лучей меняется менее значительно от одного момента времени к другому.

Конечно, более точным было бы сравнивать заземлители не по значению напряжений для конкретного тока, а по какому-либо более показательному параметру, например по вероятности перекрытия изоляции. Но для этого потребуются методы, определяющие перекрытие изоляции при напряжениях, подобных рассмотренным. Можно применить уже существующие методы для импульсов сложной формы [6], но их точность для напряжений именно такой сложности (с практически произвольной формой напряжения, несколькими изменениями полярности) под вопросом.

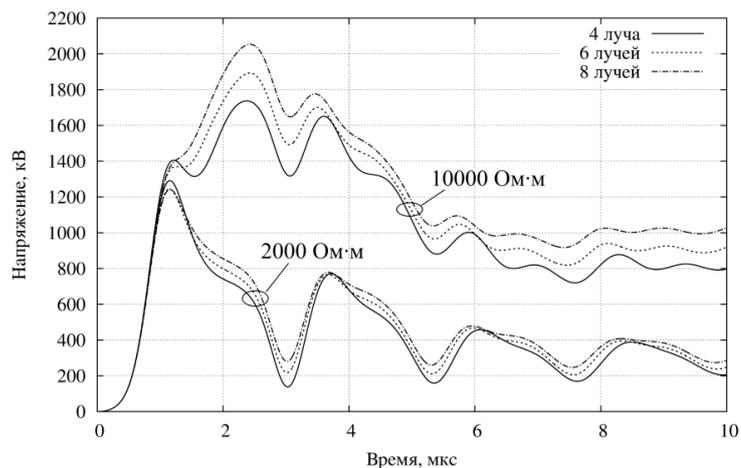


Рис.7. Напряжение на верхней фазе для импульса тока с фронтом 1 мкс (10000 Ом·м)

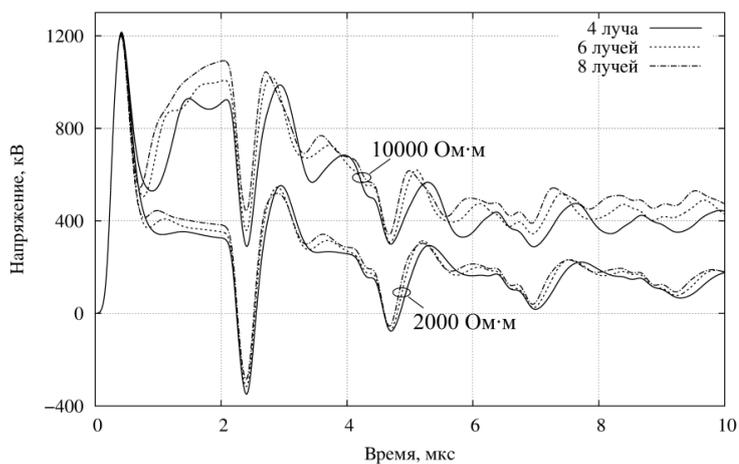


Рис.8. Напряжение на верхней фазе для импульса тока с фронтом 0.25 мкс (10000 Ом·м)

Помня об оговорках относительно точности моделирования проводников, по расчетам можно наметить вывод, что при высоких значениях удельного сопротивления грунта для проводников с длиной, близкой к рассмотренной, и схожими параметрами опоры разница между конструкциями заземлителей более заметна, чем при низких удельных сопротивлениях и предпочтительное число лучей при одинаковых условиях монтажа заземлителей – около четырех. Но для большей определенности необходимо использовать методы определения перекрытия изоляции при сложной форме напряжений и учесть хотя бы приближенно нелинейные процессы.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. СПб.: ДИАН, 2013. 1168 с.
2. Khodr H.M., Machado e Moura A., Vladimiro M. Optimal design of grounding system in transmission line // The 14th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP 2007.

3. Taflove A., Hagness S.C. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method. Third edition. Artech House, 2005. 1006 p.
4. Guiffaut C., Reineix A., Pecqueux B. New oblique thin wire formalism in the FDTD method with multiwire junctions // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012. Vol. 60. P. 1458-1466.
5. Куклин Д.В., Селиванов В.Н. Численный анализ влияния параметров опоры ЛЭП на уровень перенапряжений при прямом ударе молнии // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2014. Вып. 8. С. 46-54.
6. Chisholm W.A. New challenges in lightning impulse flashover modeling of air gaps and insulators // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2010. Vol. 26, № 2. P. 14-25.

Сведения об авторах

Куклин Дмитрий Владимирович,
научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21 А
эл. почта: kuklindima@gmail.com

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 697.3 (470.21)

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

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ В БАРЕНЦ-РЕГИОНЕ*

Аннотация

Приведены результаты анализа использования энергоресурсов в жилищно-коммунальном секторе городов Мурманской области. Выполнена работа по энергоаудиту одного из пилотных зданий г.Кировска в рамках проекта ENERU (программа «Коларктик» – программа сотрудничества, Европейский инструмент содействия и партнерства). Представлены результаты энергетического обследования и предложены мероприятия по энергоэффективности.

Ключевые слова:

энергоэффективность, энергетическое обследование, электропотребление, теплопотребление, затраты на энергоресурсы, энергетический паспорт, энергосберегающие мероприятия.

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

INTERNATIONAL COOPERATION TO IMPROVE DEMAND-SIDE ENERGY EFFICIENCY IN THE BARENTS REGION

Abstract

Results of the analysis of energy use in the residential sector of the towns of Murmansk region are given. Energy audit of one of the pilot buildings of Kirovsk within the project ENERU (Kolarctic program – a program European Instrument for Cooperation and Partnership) has been performed. Energy inspection results are presented, energy efficiency measures are proposed.

Keywords:

energy efficiency, energy audit, power consumption, heat consumption, energy costs, energy performance certificate, energy-saving measures.

В Северо-Западном регионе России с 1993 г. вопросам эффективного использования энергоресурсов уделяется большое внимание [1-3]. В 1996 г. подписано соглашение между Норвегией и Россией по сотрудничеству в области энергоэффективности по направлениям: организация и развитие энергоэффективных демонстрационных зон, создание центров энергоэффективности, выполнение энергоэффективных проектов, обучение и информационная деятельность, развитие российско-норвежской торговли и разработка финансовых механизмов для энергоэффективных проектов.

Одним из важнейших целевых показателей эффективного использования энергии для учреждений бюджетной сферы являются удельные величины потребления энергетических ресурсов, которые в свою очередь призваны обеспечить связь энергетических паспортов бюджетных организаций с региональными и муниципальными программами в области энергосбережения и повышения энергоэффективности.

Удельное потребление тепловой энергии жилищно-коммунального сектора в городах Мурманской области значительно различается (рис.1).

* Работа выполнена при финансовой поддержке по проекту ENERU (программа «Коларктик» – программа сотрудничества, Европейский инструмент содействия и партнерства).

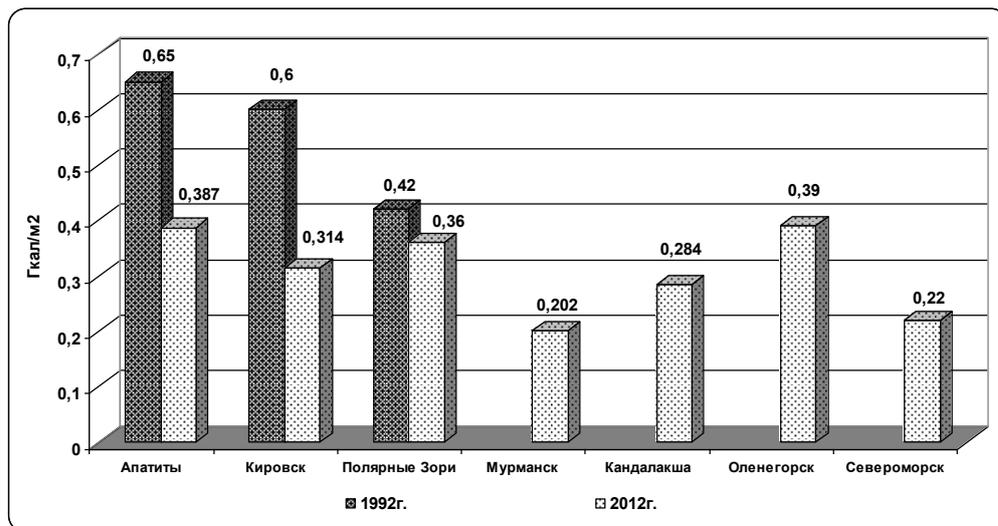


Рис.1. Удельное теплотребление в жилищно-коммунальном секторе

Это объясняется различной протяженностью тепловых сетей, тепловыми потерями, обусловленными изношенностью теплопроводов, гидравлическими режимами работы тепловых сетей, условиями регулирования параметров теплоносителя. Поэтому актуальной задачей для городов является проведение энергетических обследований [4] для разработки программ рационализации структуры и перспективного развития теплового хозяйства [5], расчета гидравлических режимов в тепловых сетях с последующей наладкой режимов работы тепловых сетей [6], разработки и внедрения энергосберегающих мероприятий [7].

Энергетические обследования и паспортизация объектов бюджетной сферы осуществляются в целях: выявления потенциала энергосбережения, определения основных энергосберегающих мероприятий, определения объектов бюджетной сферы, на которых в первую очередь необходимо проводить энергосберегающие мероприятия, установления нормативных показателей энергопотребления.

Для повышения эффективного управления энергопотреблением в Баренц-регионе в 2013-2014 гг. в рамках проекта ENERU (программа «Коларктик» – программа сотрудничества, Европейский инструмент содействия и партнерства) проводится работа по созданию сети делового сотрудничества с привлечением компаний, муниципалитетов, образовательных и научных учреждений Баренц-региона. Модель сотрудничества, создаваемая в рамках проекта, построена на основе концепции тройной спирали, которая является отображением новых экономических процессов: экономика знаний, глобализация, интеграция деятельности государств и корпораций, новые средства коммуникаций и технологий, сетевые формы организации. Технологический рывок скандинавских стран показывает, что главным условием здесь является плодотворная кооперация между бизнесом, наукой и государством на всех уровнях – локальном, национальном, международном. Преимуществом Мурманской области как части Баренц-региона является географическое положение, способствующее естественным связям между северными территориями Скандинавских стран и России. Поэтому в ходе проекта важно исследовать, как скандинавский опыт можно адаптировать для экономики в российских условиях. В ходе выполнения проекта выполняются работы по проведению энергетических обследований пилотных зданий в городах Кандалакша и Кировск.

Одной из приоритетных задач в области энергосбережения и повышения энергоэффективности для муниципального образования г.Кировск является снижение объема энергопотребления в бюджетной сфере и сокращение затрат на оплату потребленных энергоресурсов. Для выявления резервов экономии тепла на отопление зданий и разработки рекомендаций по реализации энергосберегающих мероприятий были проведены исследования в пилотном здании г.Кировска (рис.2).



Рис.2. Здание до и после реконструкции

Следует отметить, что существенную долю обобщенной теплопередачи здания составляет теплота, идущая на нагрев инфильтрующегося воздуха через наружные ограждения. Это обусловлено тем, что значительную часть наружных ограждений составляют окна, которые по своим конструктивным особенностям имеют повышенную воздухопроницаемость. Для снижения теплопотерь через светопроемы была выполнена замена окон на энергосберегающие стеклопакеты. Для увеличения теплозащиты стен выполнена установка на фасадах наружной теплоизоляции.

На рисунке 3 представлена структура затрат по видам энергетических ресурсов в общем объеме платежей за коммунальные услуги. Существенную долю в расходах занимает тепловая энергия.

Сведения об электропотреблении и финансовых затратах в 2009-2013 гг. представлены на рис.4. Основными потребителями электроэнергии являются освещение, бытовые приборы, офисное оборудование, электростанки. Для освещения помещений используются лампы накаливания 100 Вт, люминесцентные лампы (ЛБ 40, ЛБ 36 и ЛБ 18). Коридоры и лестничные площадки освещаются люминесцентными лампами. Технические помещения освещаются лампами накаливания, количество которых в процентном соотношении составляет порядка 12%, они находятся в эксплуатации значительно меньший промежуток времени по сравнению с люминесцентными лампами. Для уменьшения потребления электрической энергии в здании необходимо выполнить замену ламп накаливания на энергосберегающее освещение.

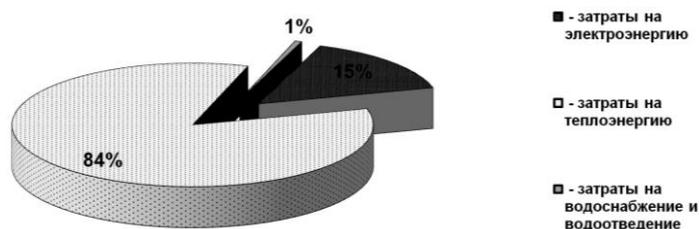


Рис.3. Структура затрат на оплату энергетических ресурсов

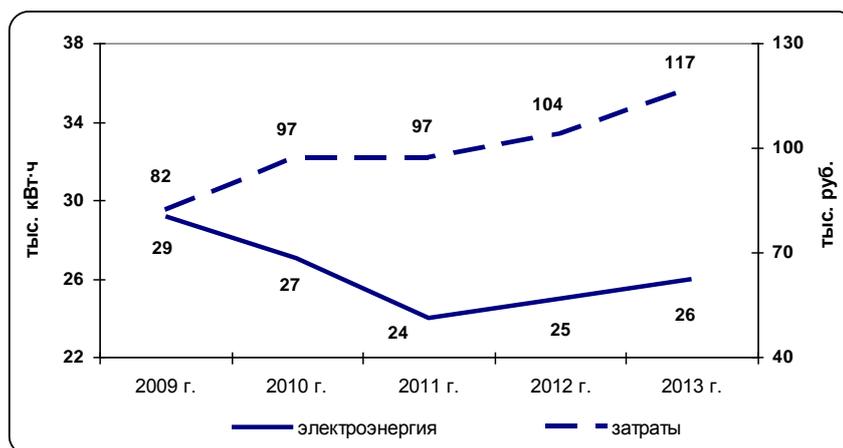


Рис.4. Динамика электропотребления и оплаты за электроэнергию

Теплоснабжение здания производится по договору на пользование тепловой энергией в горячей воде. Отпуск тепловой энергии по договору составляет 267 Гкал/год с максимумом тепловой нагрузки на отопление 0.090 Гкал/ч, на ГВС – 0.001 Гкал/ч. Сведения о теплопотреблении и финансовых затратах в 2009-2013 гг. представлены на рис.5.

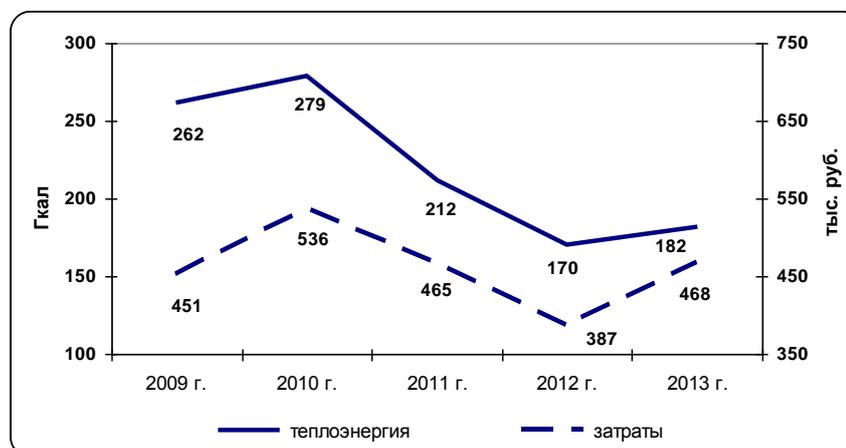


Рис.5. Динамика теплопотребления и затрат за теплоэнергию

Для совершенствования системы теплоснабжения здания целесообразным является оснащение радиаторов отопления термостатическими кранами, внедрение автоматизированного индивидуального теплового пункта с погодным регулированием.

Выводы

1. Анализ энергопотребления в жилищно-коммунальном хозяйстве городов показал, что снижение удельного теплопотребления за счет внедрения организационно-технических мероприятий с 1992 по 2012 гг. в городах Кировск, Апатиты и Полярные Зори составляет соответственно 48, 40 и 12%.

2. Для повышения эффективного управления энергопотреблением в жилищно-коммунальном хозяйстве городов необходимо создание сети сотрудничества с привлечением муниципалитетов, научных учреждений и компаний, выполняющих работы по внедрению энергосберегающих мероприятий.

Литература

1. Kusnetsov N., Salina S. Energy saving in heat-supply systems of Russian northern cities // INCORD' 94, Fourth International Symposium on Cold Region Development: extended abstracts (Finland, June 13-16, 1994). P. 172-173.
2. Кузнецов Н.М. Энергоэффективность на Севере Баренц-региона России // Проблемы энергетики Запада Европейского Севера России. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. С. 24-30.
3. Бакшеев В.П., Ефимов Б.В., Клюкин А.М. Опыт энергоснабжения и повышения энергоэффективности теплоснабжения Академгородка в г.Апатиты Мурманской области // Вестник КНЦ РАН. 2010. № 1. С.107-112.
4. Kuznetsov N.M. Energy saving and energy audit [Электронный ресурс] // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2013. № 2. URL: www.science-sd.com/455-24108 (дата обращения: 08.09.2014).
5. Кузнецов Н.М., Самсонов А.В., Бебихов Ю.В. Разработка метода моделирования рационализации систем тепло-водоснабжения северных городов с применением компьютерных технологий // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. М., 2012. № 1. С.28.
6. Kuznetsov N.M., Samsonov A.V., Bebikchov Y.V. Calculations of hydraulic regimes of heat-and-water supply systems under conditions of the Far North [Электронный ресурс] // Международный журнал экспериментального образования. 2012. № 3. URL: www.rae.ru/meo/?section=content&op=show_article&article_id=2928 (дата обращения: 08.09.2014).
7. Клюкин А.М. Роль целевых индикаторов в реализации программы энергосбережения г.Апатиты // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2013. № 2 (15), вып. 6. С.25-33.

Сведения об авторах

Клюкин Александр Михайлович,

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

Кузнецов Николай Матвеевич,

заведующий лабораторией энергетической эффективности и энергосбережения КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, Академгородок, д. 14
эл. почта: leee51@mail.ru

Трибуналов Сергей Николаевич,

инженер лаборатории энергетической эффективности и энергосбережения КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, Академгородок, д. 14
эл. почта: leee51@mail.ru

УДК 629.9 (470.21)

В.А.Минин

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НЕБОЛЬШИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация

Дана характеристика современного состояния теплоснабжения мелких потребителей Мурманской области. Представлены сведения об установленной мощности источников тепловой энергии, их структуре и объемах отпуска энергии.

Ключевые слова:

небольшие населенные пункты Мурманской области, источники теплоснабжения.

V.A.Minin

CHARACTERISTICS OF HEAT SUPPLY OF SMALL SETTLEMENTS OF THE MURMANSK REGION

Abstract

The characterization of the current state of the Murmansk region small consumers heat supply is given. Information on installed capacity of heat sources, their structure and amount of energy release is presented.

Keywords:

small settlements of the Murmansk region, sources of heat.

По результатам анкетирования, проведенного в 2011 г. Министерством энергетики и ЖКХ Мурманской области, общая установленная мощность источников централизованного теплоснабжения региона достигает 7162 Гкал/ч (табл.1). При этом суммарная подключенная тепловая нагрузка абонентов источников теплоснабжения составляет 3381 Гкал/ч. Имеющаяся разница между установленной мощностью и подключенной нагрузкой свидетельствует о значительном избытке мощностей на большинстве действующих источников теплоснабжения. По табл.1 можно проследить за распределением теплогенерирующих мощностей по отдельным районам Мурманской области – городским округам, муниципальным районам и закрытым административно-территориальным образованиям (ЗАТО). Наконец, представленные данные позволяют провести также анализ численности и структуры генерирующих мощностей региона. Оказалось, что в Мурманской области наибольший вклад в выработку тепловой энергии дают крупные и средние котельные и ТЭЦ мощностью 15 Гкал/ч и выше (рис., б). На их долю приходится 94.5% всей выработки. Остальные 5.5% вырабатываются на небольших источниках тепловой энергии мощностью менее 15 Гкал/ч. Однако число таких источников в силу многочисленности малых потребителей энергии велико. На их долю приходится более половины (58.8%) от общего числа котельных (рис., а).

В крупных городах области большинство потребителей охвачено централизованным теплоснабжением от крупных котельных и ТЭЦ [2]. В них доля выработки тепла на источниках малой мощности составляет от нескольких процентов до долей процента. Так, например в Мурманске [2], имеется около 10 крупных источников тепла суммарной мощностью около 1950 Гкал/ч и всего 3 котельных малой мощности (табл.2), которые вырабатывают около 0.3% всей энергии. Города Апатиты и Кировск снабжаются тепловой энергией от Апатитской ТЭЦ. Малых источников теплоснабжения в районе расположения этих городов не выявлено.

Таблица 1

Общая характеристика источников теплоснабжения Мурманской области [1]

Населенный пункт	Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	Подключенная нагрузка, Гкал/ч	Отпуск тепла за год, тыс. Гкал	Количество источников тепла	Количество котлов
Городские округа с подведомственными территориями					
Мурманск	1947	1045	3218	13	73
Апатиты	735	397	1284	1	10
Кировск	632	128	1071	5	27
Мончегорск	841	402	1294	7	58
Оленегорск	294	197	671	3	10
Ковдор	559	218	823	6	25
Полярные Зори	181	143	291	5	31
ЗАТО Североморск	554	195	897	11	68
ЗАТО Александровск	351	193	599	5	25
ЗАТО Видяево	41	26	73	1	6
Муниципальные районы					
Кольский	345	145	440	31	132
Печенгский	428	164	674	6	43
Кандалакшский	155	68	258	37	114
Ловозерский	70	43	133	2	9
Терский	29	17	58	3	17
Мурманская обл., всего	7162	3381	11784	136	648

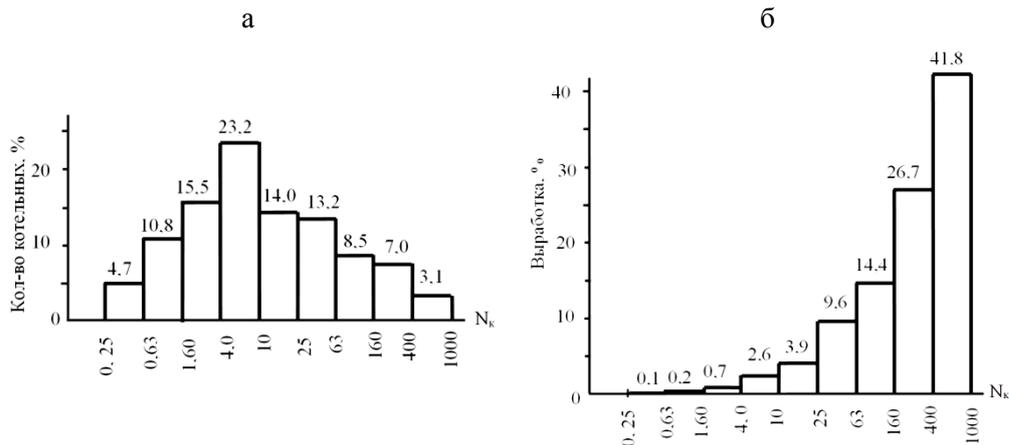
Таблица 2

Мелкие котельные в районе г.Мурманска

Источники	Установленная мощность, Гкал/ч	Подключенная нагрузка, Гкал/ч	Отпуск тепла за год, тыс. Гкал	Котлы	
				марка	количество
Котельная ММУП «ЖСК» на дизтопливе	1.52	0.94	3.4	GTE-521	1
				GTE-511	2
Котельная ММУП «ЖСК» на угле	2.63	0.91	4.6	Э5-Д5 пар	2
				Э5-Д5 вода	3
				КСВр-0.8 вод.	1
				НИИСТУ 5М	2
Котельная «Мурманскводоканала»	1.1	1.1	1.7	КЭВ	2
Итого	5.25	2.95	9.7	-	13

Основным источником теплоснабжения г.Мончегорска является ТЭЦ ОАО «Кольская ГМК» мощностью 828 Гкал/ч [2]. Административно Мончегорску подчиняются два поселка, названные 25-й километр и 27-й километр в соответствии с километровой отметкой железной дороги Оленегорск – Мончегорск. В первом население составляет 255 чел., в нем расположен военный аэродром Мончегорск. Во втором – население 2359 чел., здесь расположен гарнизон авиационного полка. Теплоснабжение в этих поселках, а также в населенных пунктах Протоки, Нефтяник-2 и Тишина, тоже находящихся в административном подчинении Мончегорска, обеспечивается от мелких угольных котельных, основные показатели которых представлены в табл.3.

Основными источниками теплоснабжения Оленегорска являются угольная котельная ООО «ТЭК» мощностью 240 Гкал/ч [2], а также мазутная котельная мощностью 12 Гкал/ч, обеспечивающая тепловой энергией воинскую часть.



Структура котельных Мурманской области по мощности (а) и вырабатываемой на них тепловой энергии (б)

Таблица 3

Показатели котельных в населенных пунктах вблизи Мончегорска

Населенный пункт, название котельной	Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	Подключенная нагрузка, Гкал/ч	Отпуск тепла за год, тыс. Гкал	Котлы	
				марка	количество
Котельная МУП «Городское благоустройство» Н.п. 27-й км (угольная котельная № 340)	2.0	0.7	3.1	Богатырь КВ-1.16К	1
				КВр-1.16	1
				Энергия 3М	3
				КВр 0.54	2
				Универсал-6	1
				КС-5-2	4
Н.п. 27-й км (угольная котельная № 350)	7.9	5.7	19.0	ДЖК-0.7	1
				Э5-Д2	1
				Энергия 3М	4
				НИИСТУ-5	4
				Универсал 6	1
				КС-5-2	2
Н.п. Протоки, угольная котельная № 14	9.6	9.1	16.8	Э5-Д2	3
				ДКВР 4-13	4
Нефтяник-2, угольная котельная № 45	2.4	0.5	2.3	Э5-Д2	5
Н.п. Тишина, угольная котельная № 7	4.4	0.6	2.3	Э2-Д5	3
				Универсал 6	2
				КС-5-2	2
Итого	34.8	22.5	61.5	-	44

В пос. Высокий на подведомственной Оленегорску территории действует мазутная котельная мощностью 42 Гкал/ч, находящаяся в хозяйственном ведении ГОУТП «ТЭККОС».

Таким образом, всего в Оленегорске и на подведомственной ему территории работают три источника тепловой энергии суммарной мощностью 294 Гкал/ч. Мелких источников мощностью до 15 Гкал/ч не выявлено.

Город Полярные Зори расположен в южной части Кольского полуострова. Теплоснабжение г. Полярные Зори и пос. Зашеек осуществляется от мазутной котельной ОАО «Тепловодоснабжение» мощностью 117 Гкал/ч и электрочотельной мощностью 56 МВт, принадлежащей Кольской АЭС [2].

К северу от г.Полярные Зори находится пос.Африканда, в котором проживает 1644 чел. Этот поселок состоит из двух разобщенных частей. Теплоснабжение одной из них (вблизи одноименной железнодорожной станции) осуществляется от двух источников: небольшой электродотельной мощностью 0.35 Гкал/ч и угольной котельной мощностью 4.2 Гкал/ч. Теплоснабжение Африканды-2 обеспечивается от электродотельной мощностью 11.7 Гкал/ч. Показатели работы этих котельных приведены в табл.4.

Таблица 4

Показатели котельных в поселках Африканда-1 и Африканда-2

Населенный пункт	Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	Подключенная нагрузка, Гкал/ч	Отпуск тепла в 2010 г., тыс. Гкал	Котлы	
				марка	количество
Африканда-2, эл. котельная	11.7	5.0	21.8	КЭВ 4000/10	3
				КЭВ 1600/10	1
Африканда-1, эл. котельная	0.35	0.28	1.1	КЭВ-175	2
				OSO-18R	1
Африканда-1, угольная котельная № 263	4.2	1.29	4.5	Э5-Д2	4
				КС-5-2	1
				ДЖК-0.7	2
Итого	16.25	6.57	27.4	-	14

К югу от г.Полярные Зори и пос.Африканда находится г.Кандалакша. Административно в состав этого города входят населенные пункты Нива-3, Лупче-Савино и Лесозавод № 6. Поселок Лупче-Савино представляет собой военный городок, расположенный в 7 км к северо-западу от г.Кандалакши.

Основными источниками теплоснабжения г.Кандалакша являются котельные № 1, 21 ГОУТП «ТЭКОС» мощностью 111 и 51 Гкал/ч, а также котельная ООО «Центра коммунальных технологий» мощностью 78 Гкал/ч [2]. На эти три самые крупные котельные города приходится 240 Гкал/ч тепловой мощности (91%) и 435 тыс. Гкал выработки (92%). Кроме них в городе имеется еще 11 мелких котельных, на которые приходится всего около 8% годовой выработки, на которых задействовано 48 котлов малой производительности (табл.5).

Кроме Кандалакши в Кандалакшский муниципальный район также входит довольно много больших и малых поселков и сельских населенных пунктов, таких как поселки Алакургти, Зеленоборский, Нивский, Белое море, Лувеньга и др. Эти пункты имеют разную хозяйственную направленность. Это заготовка и переработка древесины, перевалка нефтепродуктов, обслуживание ГЭС, оборонных объектов и т.д. Если в первых двух поселках имеющиеся котельные можно отнести к категории средних (их мощность соответственно 74.1 и 20.4 Гкал/ч), то во всех остальных населенных пунктах мощность источников теплоснабжения в основном не превышает 5 Гкал/ч. Основные показатели этих котельных представлены в табл.6.

В Ковдоре основным источником теплоснабжения города и объектов ОАО «Ковдорский ГОК» является ТЭЦ горно-обогатительного комбината, работающая на мазуте. Установленная тепловая мощность ТЭЦ составляет 503 Гкал/ч [2]. В пос.Енский мощность котельной составляет 33.9 Гкал/ч. Еще четыре мелких населенных пункта Ковдорского района также имеют источники централизованного теплоснабжения, но малой мощности. Это пос.Лейпи, с.Ена, пос.Риколатва, н.п.Куропта (табл.7).

Таблица 5

Показатели источников теплоснабжения г.Кандалакша

Источник теплоснабжения	Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	Подключенная нагрузка, Гкал/ч	Отпуск тепла за год, тыс. Гкал	Котлы	
				марка	количество
Котельная № 8а	3.2	1.8	4.4	Е-1.0-0.9М-3	2
				Е-1.0-0.9Г-3	1
				Е-1.0-0.9Р-3	1
				Братск	1
Котельная № 10 (на дизтопливе)	4.2	1.3	3.9	Минск	1
				Братск	3
				Факел	2
Эл. котельная «Кандалакшской горэлектросети»	2.16	0.91	1.4	ЭЛКОМ	3
Уг. котельная МУП «Недвиж. Кандалакши»	0.27	0.25	1.94	У-6	3
Эл. кот. Канд. дор. рем.-строит. предприятия	0.35	0.34	0.88	ЭЭП-100/160	4
Кандалакшский военный гарнизон № 1					
Уг. Котельная № 1	2.34	0.62	2.26	НИИСТУ	2
				Э5-Д2	3
№ 3	2.84	1.98	16.5	Э5-Д2	6
№ 4	3.29	1.29	3.9	НИИСТУ	3
				Э5-Д2	4
№ 57	0.69	0.17	0.7	Универсал	2
№ 12	2.1	0.64	3.0	Э5-Д2	3
				Универсал	2
Кандалакшский военный гарнизон № 27, в/ч 2431					
Уг. котельная № 22	0.95	0.26	0.5	Э5-Д2	2
Итого	22.39	9.56	39.38		48

Много малых источников теплоснабжения имеется в Кольском районе. Сам г.Кола удален от Мурманска на 12 км. Основным источником централизованного теплоснабжения города является котельная ГОУТП «ТЭКОС» мощностью 78 Гкал/ч [2].

На территории Кольского муниципального района расположено много небольших населенных пунктов. Их хозяйственная деятельность связана с обслуживанием объектов энергетики (Мурмаши, Верхнетуломский, Туманный), Октябрьской железной дороги (Шонгуй, Лопарская, Тайбола), производством сельскохозяйственной продукции (Молочный, Междуречье, Тулома, Зверосовхоз) и др. Теплоснабжение таких пунктов обеспечивается от мелких котельных мощностью от 1-2 до 10-15 Гкал/ч. Всего в Кольском районе насчитывается около 30 небольших котельных. На них задействовано около 110 котлов. Подробная информация о структуре котельных, их мощности и годовой выработке представлена в табл.8.

Печенгский муниципальный район занимает крайнюю северо-западную часть Кольского полуострова. Административным центром района является пос.Никель с населением 12.7 тыс. чел. Другим крупным населенным пунктом района является г.Заполярный (15.8 тыс. чел.). Теплоснабжение этих двух поселений осуществляется от ТЭЦ ОАО «Кольская ГМК» мощностью соответственно 180 и 230 Гкал/ч [2] (табл.9).

Таблица 6

Показатели работы мелких котельных
в населенных пунктах Кандалакшского муниципального района

Населенный пункт, источник тепловой энергии	Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	Подключенная нагрузка, Гкал/ч	Отпуск тепла за год, тыс. Гкал	Котлы	
				марка	количество
Пос.Зеленоборский, котельная № 6	4.3	2.3	6.5	Братск	4
				НИИСТУ	1
				КВ-300	1
				КП-0.12Ж	1
угольная котельная № 17	2.37	0.43	1.9	Э5-Д2	5
угольная котельная	1.08	0.3	1.9	КВр-0.63	2
угольная котельная	2.82	0.87	5.6	КЭВ 1000	4
угольная котельная в/ч 56	2.37	0.43	1.89	Э5-Д2	5
Пояконда (ж.-д. ст.)	0.17	0.06	0.41	ЗПЗ-100	2
Ковда (ж.-д. ст.)	0.17	0.06	0.41	ЗПЗ-100	2
Белое море	6.2	6.2	36.9	КАВЗ	3
				ДКВР	2
Лупче-Савино, угольная котельная № 20	3.19	0.95	3.53	Э5-Д2	4
				ДЖК	2
№ 22	4.73	1.38	5.05	Э5-Д2	10
№ 21	2.84	1.38	2.5	Э5-Д2	6
№ 50	4.45	1.63	4.65	НИИСТУ	2
				Э5-Д2	6
				Универсал	2
№ 55	0.93	0.17	0.38	НИИСТУ	2
Пос.Нивский, котельная № 17	6.56	4.94	14.8	Е-1.0-0.9М	2
				Братск	4
				Факел	4
Пос.Пиозеро, угольная котельная № 26	0.95	0.1	0.23	Э5-Д2	2
				НР (4)	2
№ 27	0.34	0.17	0.54	НИИСТУ	1
№ 44	7.65	2.58	7.5	Универсал	1
				Э5-Д2	4
				ДЖК	7
№ 28	1.04	0.31	0.99	Универсал	1
				Луга	1
№ 29	0.52	0.17	0.54	Э5-Д2	2
Пос.Проливы, угольная котельная № 68	1.55	0.38	1.52	НИИСТУ	3
С.Лувеньга, эл. котельная	6.0	5.51	4.8	КЭВ 1600/6	1
				КЭВ 2500/6	2
				КЭВ 400/0.4	1
Итого	60.23	30.32	102.54	-	104

Таблица 7

Показатели котельных в населенных пунктах Ковдорского района

Населенный пункт	Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	Подключенная нагрузка, Гкал/ч	Отпуск тепла за год, тыс. Гкал	Котлы	
				марка	количество
Пос.Риколатва	4.7	1.3	5.0	ДКВР 4/13 ГМ	2
Пос.Куропга (дрова)	1.8	0.6	2.2	Минск-11	2
				КВр-0.63	2
С.Ена	3.5	1.2	5.6	КЭВ 1600/6	1
				КЭВ 2500/6	1
Пос.Лейпи	11.7	3.3	7.0	ДКВР 6.5/13	3
Итого	21.7	6.4	19.8	-	11

Таблица 8

Котельные малой мощности в населенных пунктах Кольского района

Населенный пункт, котельная	Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	Подключенная нагрузка, Гкал/ч	Отпуск тепла за год, тыс. Гкал	Котлы	
				марка	количество
Ура-Губа	2.5	1.7	4.6	Ква-1.44ГМ	2
Туманный	11.0	2.6	11.7	КЭВ-1.9	6
Междуречье	8.8	3.1	9.4	КЭВ-2500/16	4
Тулома	15.7	5.9	24.7	КЭВ-6000/6	3
Верхнетуломский эл. котельная	1.72	1.1	3.33	ИМАТРАН 400/0.4	5
эл. котельная	4.13	0.73	3.08	КЭВ 1600/6	2
котельная на мазуте и опилках	10.9	6.45	16.44	Корсака 1600/0.4 ДКВР-4/13	1 3
Пушной	11.0	4.4	18.2	«SAXLUND» КЭВ 400/0.4	1 7
				КЭВ 4000/6	2
				КЭВ 1000/6	2
Лопарская	1.68	0.37	4.06	КЭВ 100/6	2
Песчаный	1.36	0.50	1.96	КЭВ 400/0.4	4
Мокрая Кица	1.02	0.09	1.28	То же	3
Молочное	1.17	0.57	1.68	КЭВ	2
Мурмаши					
Цесарского, 6	12.9	6.42	22.2	КЭВ 2500/6	6
Мисякова, 1а	6.4	2.02	6.59	То же	3
Советская, 12а	4.1	1.71	5.57	КЭВ 1600/6	3
Московская, 12	4.1	1.21	4.44	То же	3
Энергетиков, 14а	6.4	3.32	11.4	КЭВ 2500/6	3
Энергетиков, 23а	6.4	2.27	7.61	То же	3
Полярная, 11б	2.75	0.50	0.49	КЭВ 1600/6	2
Советская, 4	1.03	0.18	0.55	КЭВ 400/0.4	3
Кутахова, 1а	8.6	3.38	14.1	КЭВ 2500/6	4
Молодежная, 1а	10.7	4.83	12.9	То же	5
Котельная исправ. колонии	5.57	3.0	10.5	«Братск М» КВр-1.16	4 1
Кильдинстрой эл. котельная	14.24	1.84	14.1	КЭВ	4
уг. котельная	5.28	2.06	8.16	KWZ 2000 ДЖК-063Т	2 2
мазутная котельная	14.4	7.49	20.5	КЕ 10/14 ДКВР 4/13	2 1
Зверосовхоз, эл. котельная	13.6	3.65	11.9	КЭВ	4
Шонгуй	6.0	3.91	10.2	Е-1/9. водогр. Е-1/9 пар.	6 4
Итого	193.45	75.3	261.64	-	114

Ловозерский муниципальный район является самым большим в регионе по занимаемой площади, он охватывает северо-восточную треть Кольского полуострова. В административном центре района, с.Ловозеро, проживает около 2.8 тыс. чел. Более крупным населенным пунктом района является пос.Ревда (8.4 тыс. чел.), в котором располагается основное предприятие района – Ловозерский горно-обогатительный комбинат. Имеющиеся другие мелкие населенные пункты района (Краснощелье, Каневка и Сосновка) имеют численность населения соответственно 423, 67 и 45 чел., удалены от районного центра на 150-300 км, их производственная деятельность регулируется оленеводческим кооперативом «Оленевод».

Таблица 9

Показатели котельных в населенных пунктах Печенгского района

Населенный пункт	Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	Подключенная нагрузка, Гкал/ч	Отпуск тепла за год, тыс. Гкал	Котлы	
				марка	количество
Пос.Спутник, угольные котельные № 1 и 2	15.4	7.0	23.4	КВ 1.16К Э5-Д2 ВНИИСТУ 5 КСВ-Ф-1.0-95Н	18
Пос.Раякоски	0.95	0.86	3.6	Иностр.	5
Пос.Корзуново	1.61	0.5	3.06	Энергия 3-М	4
Итого	17.96	8.36	30.06	-	27

В районе имеется только два источника централизованного теплоснабжения, оба средней производительности. Это две мазутные котельные (в Ревде и Ловозере), находящиеся в хозяйственном ведении ГОУТП «ТЭКОС» и имеющие мощность соответственно 51.2 и 18.3 Гкал/ч [2]. Малых источников централизованного теплоснабжения в районе не имеется.

Терский муниципальный район занимает южную часть Кольского полуострова. Большинство его населенных пунктов расположено на берегу Белого моря. Административным центром района является пос.Умба с населением около 5.5 тыс. чел. (88% всего населения района). Здесь сосредоточены основные источники централизованного теплоснабжения. Показатели работы этих источников представлены в табл.10.

Таблица 10

Показатели котельных в населенных пунктах Терского района

Населенный пункт	Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	Подключенная нагрузка, Гкал/ч	Отпуск тепла за год, тыс. Гкал	Котлы	
				марка	количество
Пос.Умба, котельная № 15	14.4	13.1	42.2	ДЕ 10/14	2
				ДКВР 4/13	1
Пос.Умба	8.57	1.57	4.55	Е 1.0-0.9М-3	2
				Е-1/9-2М	1
				Братск	4
				КЭВ 4000/6	2
Итого	28.57	17.26	57.55	ЭПЗ-100 И 2	3
				Универсал 8М	2
				-	17

Информации о котельных установках в прибрежных поморских селах района (таких насчитывается семь с суммарной численностью населения около 720 чел.) не имеется. Как и в Ловозерском районе, в этих селах местным населением широко используется печное отопление.

В Мурманской области имеется несколько закрытых административно-территориальных образований (ЗАТО), население которых эксплуатирует и обслуживает объекты Северного флота. ЗАТО г.Североморск располагается примерно в 20 км к северо-востоку от Мурманска, оно объединяет Североморск (50 тыс. чел.), Североморск-3 (2.6 тыс. чел.), Сафоново (5.2 тыс. чел.), Росляково (8.7 тыс. чел.), пос.Щук-Озеро (0.7 тыс. чел.).

Теплоснабжение Североморска и близлежащих населенных пунктов обеспечивает МУП «Североморские тепловые сети». Собственно в Североморске имеется три крупных котельных мощностью 175, 180 и 55.2 Гкал/ч, в Североморске-3 – 25.2 Гкал/ч, в пос.Малое Сафоново – 45.6 Гкал/ч, в Росляково – 54 Гкал/ч, в Щук-Озеро – 25.2 Гкал/ч [2]. Показатели работы более мелких котельных, работающих на территории данного ЗАТО, представлены в табл.11. Основное топливо котельных – мазут, в отдельных случаях используется уголь и дизельное топливо.

Таблица 11

Показатели котельных малой мощности в ЗАТО Североморск и Александровск

Населенный пункт, котельная	Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	Подключенная нагрузка, Гкал/ч	Отпуск тепла за год, тыс. Гкал	Котлы	
				марка	количество
Г.Североморск котельная «Кортик»	5.3	1.8	7.8	НИИСТУ 5 НИИСТУ 8	5 2
уг. котельная, ул. Восточная	1.7	0.7	3.2	«Нева» КП26-1 «Нева» КВ-Р-0.8	1 3
Юж. Росляково, угольная котельная (ул. Молодежная)	7.7	2.75	10.8	Лотос Е-0.7-1.2 «Нева» КП 2Б-10 «Нева» СТВ 0.8 «Нева» СТВ 0.6 КВТ 1/95	1 2 2 2 3
Пос.Щук-Озеро, котельная на мазуте	4.2	1.1	5.6	НИИСТУ 5	7
на дизтопливе	0.5	0.4	1.6	Vitoplex	2
Оленья Губа	6.9	3.0	13.6	S3V-4	2
Итого	26.3	9.75	42.6	-	32

Северо-западнее Мурманска расположено ЗАТО г.Александровск. С общей численностью населения около 43 тыс. чел. Это образование объединяет три ранее существовавших ЗАТО – Скалистый (ныне Гаджиево), Снежногорск и Полярный. Теплоснабжение потребителей ЗАТО Александровск ведется от пяти котельных. Мощность котельных в Полярном составляет 105 Гкал/ч, в Снежногорске – 109.9 и 54 Гкал/ч, в Гаджиево – 75.1 Гкал/ч [2]. Это все крупные котельные. В число мелких попадает лишь котельная в пос.Оленья Губа (табл.11).

Также к северо-западу от Мурманска находится ЗАТО пос.Видяево. Численность населения в этом образовании составляет 5.8 тыс. чел. Теплоснабжение населенного пункта осуществляется от котельной мощностью 40.8 Гкал/ч [2]. Мелких котельных в поселке не имеется.

Выводы

1. Теплоснабжение мелких потребителей Мурманской области осуществляется примерно от 80 котельных. Это более половины (58.8%) от общего количества котельных области. За год на них вырабатывается всего около 650 тыс. Гкал или 5.5% всей тепловой энергии.

2. Суммарная установленная мощность мелких котельных области составляет 427 Гкал/ч, а общая подключенная тепловая нагрузка – 189 Гкал/ч, что более чем в 2.2 раза меньше. Соответственно, число часов использования установленной мощности котельных составляет 1525, а число часов использования подключенной нагрузки – 3450. Это свидетельствует о значительных резервах мощности, позволяющих полностью удовлетворять потребности в тепловой энергии как в настоящее время, так и в перспективе.

Литература

1. Минин В.А. Возможные направления энергосбережения в сфере теплоснабжения Мурманской области // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2013. Вып. 6, № 2. С. 5-14.
2. Минин В.А. Теплоснабжение городов Мурманской области // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2014. Вып. 8, № 3. С. 67-77.

Сведения об авторе

Минин Валерий Андреевич,

заведующий лабораторией энергосбережения и возобновляемых источников энергии

Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к.т.н.

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

эл. почта: minin@jen.kolasc.net.ru