



*Российская Академия Наук*

**ТРУДЫ**

**Кольского научного центра РАН**

**4/2013 (17)**

**ЭНЕРГЕТИКА**

выпуск 7

Апатиты  
2013

*Российская Академия Наук*

# ТРУДЫ

**4/2013 (17)**

издается с декабря 2010 г.

УДК 621.314

ISSN 2307-5252

ISBN 978-5-91137-261-3

**Кольского научного центра РАН**

Главный редактор - академик В.Т. Калинин

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

Редакционный совет

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

## ЭНЕРГЕТИКА

выпуск 7

Редколлегия серии "Энергетика"

д.т.н. Б.В. Ефимов, (отв.редактор, 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, д.14.  
Кольский научный центр РАН  
Тел.(81555)79226. Факс (81555)76425  
E-mail: admin@admksk.apatity.ru <http://www.kolasc.net.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<b>ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ</b>	
Коровкин Н.В., Кочетов С.В., Ткаченко С.В., Ефимов Б.В.	7
Ефимов Б.В., Гумерова Н.И.,	13
Данилин А.Н., Ивонин В.В.	32
Данилин А.Н., Ивонин В.В., Куклин Д.В.	38
Джура Д.А., Селиванов В.Н.	56
Баранник М.Б., Колобов В.В.	66
<b>ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ</b>	
Бурцев А.В., Невретдинов Ю.М.	73
Власко Д.И., Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П.	81
Ярошевич В.В., Невретдинов Ю.М.	90
Баранник М.Б., Евстигнеев А.В., Колобов В.В.	101
<b>ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ</b>	
Кубарьков Ю.П., Рыгалов А.Ю., Макаров Я.В., Карпов А.С.	108

Кубарьков Ю.П., Анализ и восстановление режимов работы систем Рыгалов А.Ю., электроснабжения с помощью мультиагентной системы.....	112
Макаров Я.В., Карпов А.С. Карпов А.С., Оценка эффективности мониторинговых исследований качества Ярошевич В.В., электроэнергии по ГОСТ 13109-97 в высоковольтной сети Карпова О.М. 6-150 кВ.....	117
Бабарыгина Е.С., Разработка малозатратных технических мероприятий Веселов А.Е., по экономии электроэнергии в распределительных сетях Токарева Е.А., 6 и 0.4 кВ ОАО «Апатит».....	122
Фастий Г.П.	

#### ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Коновалова О.Е. Возможности использования микроГЭС на Кольском полуострове Иванова Е.А.	132
--	-----

*Russian Academy of Sciences*

# transactions

4/2013 (17)

UDK 621.314

ISSN 2307-5252

ISBN 978-5-91137-261-3

**Kola Science Centre**

Editor in Chief - Academician V.T.Kalinnikov

Deputy editor in Chief:

Doctor of Geology and Mineralogy V.P.Petrov  
Dr. of Sciences B.V.Efimov

Editorial Council of RAS:

Academicians:

G.G.Matishov, N.N.Melnikov, F.P.Mitrofanov.

Corresponding Members of RAS:

V.K.Zhirov, A.I.Nikolaev.

Dr. of Sciences:

Yu.L.Voitekhovskiy, F.D.Larichkin, V.A.Masloboev,

V.A.Putilov, E.D.Tereshchenko,

Ph.D. A.N.Vinogradov (executive secretary)

## ENERGY TECHNOLOGY series 7

Editorial board of Energy Technology Series:

Dr. of Sciences:

B.V.Efimov (executive editor, energy technology),

A.A.Zhamaletdinov (electrophysics),

N.V.Korovkin (theoretical electrotechnology),

F.Ch.Chalilov (power engineering),

Ph.D.:

B.G.Barannik (energy technology),

N.I.Gumerova (power engineering),

A.N.Danilin (power engineering),

V.A.Minin (renewable energy),

Yu.M.Nevretdinov (power engineering),

V.N.Selivanov (power engineering),

A.F.Usov (electrotechnology)

14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209,  
Кольский научный центр РАН  
Tel.(81555)79226. Fax: (81555)76425  
E-mail: admin@admksk.apatity.ru <http://www.kola>

CONTENTS

	Pages
PHYSICOTECHNICAL PROBLEMS OF POWER ENGINEERING	
Korovkin N.V., Kotchetov S.V., Tkachenko S.V., Efimov B.V.	7
Efimov B.V., Gumerova N.I.	13
Danilin A.N., Ivonin V.V.	32
Danilin A.N., Ivonin V.V., Kuklin D.V.	38
Djura D.A., Selivanov V.N.	56
Barannik M.B., Kolobov V.V.	66
ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY	
Burtsev A.V., Nevretdinov Y.M.	73
Vlasko D.I., Nevretdinov Y.M., Fastiy G.P.	81
Yaroshevich V.V., Nevretdinov Y.M.	90
Barannik M.B., Evstigneev A.V., Kolobov V.V.	101
ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY CONSERVATION	
Koubarkov Y.P., Rygalov A.Yu., Makarov Ya.V., Karpov A.S.	108
Koubarkov Y.P., Rygalov A.Yu., Makarov Ya.V., Karpov A.S.	112

Karpov A.S., Yaroshevich V.V., Karpova O.M.	Assessment of efficiency of monitoring researches on electric power quality in accordance with GOST 13109-97 in the 6-150 kV high-voltage network.....	117
Babarigina E.C., Veselov A.E., Tokareva E.A., Fastiy G.P.	Development of low-cost technical measures of electric power economy in the distributive 6 and 0.4 kV networks of Apatit JSC.....	122
RENEWABLE ENERGY		
Konovalova O.E., Ivanova E.A.	Possibility of using micro hydro power stations on the Kola Peninsula.....	132

# ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

УДК 621.311

Н.В.Коровкин, С.В.Кочетов, С.В.Ткаченко, Б.В.Ефимов

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ СИСТЕМЫ «ПРОВОД КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ НАД ПРОВОДЯЩЕЙ ЗЕМЛЕЙ» С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛИ И ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ\*

### Аннотация

Рассмотрен альтернативный по отношению к [1] подход, позволяющий учитывать при расчете волновых процессов в длинных линиях конечной длины эффект. Рассмотренный подход основан на тех же уравнениях, что и [1], позволяет упростить схему замещения крайних звеньев линии, вносящих наибольший вклад в излучение электромагнитной энергии. При большей простоте результаты расчетов волновых процессов с применением рассмотренного в настоящей работе подхода совпадают с рассмотренными в [1]. В рамках предложенного подхода относительно просто учитывается частотная зависимость эквивалентных параметров длинной линии от частоты, вызванная поверхностным эффектом и эффектом близости.

### Ключевые слова:

схема замещения длинной линии конечной длины, частотные характеристики, излучение электромагнитной энергии проводами длинной линии.

N.V.Korovkin, S.V.Kotchetov, S.V.Tkachenko, B.V.Efimov

## EQUIVALENT CIRCUIT OF SYSTEM «FINITE LENGTH WIRE ABOVE THE CONDUCTIVE PLANE» WITH TAKING INTO ACCOUNT ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF EARTH AND RADIATION OF ELECTROMAGNETIC ENERGY

### Abstract

An alternative for approach [1] that allows to take into account the finite length of transmission line during calculations of wave processes is considered. The approach is based on the same equations what we considered in [1], but it gives simplification of equivalent circuit of outside (left and right) parts of transmission line. Exactly these parts give the maximum contribution to radiation of electromagnetic field by the wires of transmission line. The results of wave processes calculations obtained by the considered approach agrees with [1]. Within the bounds of the approach the frequency dependences of equivalent parameters of transmission lines, that are determined by the skin- and proximity effects, are easy to consider.

### Keywords:

equivalent circuit of the finite transmission line, frequency characteristics, radiation of electromagnetic energy by wires of transmission line.

В работе [1] была поставлена задача создания подхода, позволяющего одновременно учитывать поверхностный эффект, эффект близости и излучение электромагнитной энергии в проводах линий, основанного на обобщенной системе телеграфных уравнений. Фактически в [1] рассмотрен подход, позволяющий с высоким уровнем детализации учитывать конечность размеров линии. Там же в соответствии с работами [2-4] получена в частотной области система уравнений для провода конечной длины над проводящей поверхностью:

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}(z)}{dz} = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} F\{I(z)\} + \dot{E}_z^{ext}(z), \\ \frac{dF\{I(z)\}}{dz} = -j\omega 4\pi\epsilon \dot{U}(z) - g(z,l)I(l) + g(z,0)I(0). \end{cases} \quad (1)$$

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-00690).



где  $l$  – длина линии;  $\dot{E}_z^{ext}(z)$  – внешнее электрическое поле, возбуждающее ток  $\dot{I}$  в линии;

$$g(z, z') = \frac{e^{-jK\sqrt{(z-z')^2 + a^2}}}{\sqrt{(z-z')^2 + a^2}} - \frac{e^{-jK\sqrt{(z-z')^2 + 4h^2}}}{\sqrt{(z-z')^2 + 4h^2}} \quad - \text{ функция Грина задачи;}$$

$\dot{U}$  – скалярный электрический потенциал;  $a$  – радиус провода;  $h$  – высота его подвеса над идеально проводящей землей;  $K = \omega/V_c$  – волновое число;  $V_c$  – скорость света;  $\omega$  – угловая частота;

$$F\{\dot{I}(z)\} = \int_0^l g(z, z') \dot{I}(z') dz'.$$

Схема замещения линии с учетом излучения, полученная в [1], довольно сложна и ее использование в расчетах затруднено. В заключении [1] на основании анализа поведения функции Грина задачи был сделан вывод о том, что существенный вклад в излучение электромагнитной энергии с проводов линии вносят только ее концы. В физическом плане это может быть объяснено тем, что именно концы линии представляют собой «неоднородности». В настоящей работе предлагается новый подход, в котором указанное обстоятельство учитывается в качестве упрощающего схему замещения линии предположения.

Выполним преобразование системы обобщенных телеграфных уравнений (1) к виду, удобному для построения цепной схемы замещения. Интеграл свертки  $F\{\dot{I}(z)\}$  преобразовывается следующим образом:

$$F\{\dot{I}(z)\} = \int_0^l g(z, z') \dot{I}(z') dz' = \dot{I}(z) \int_0^l g(z, z') \frac{\dot{I}(z')}{\dot{I}(z)} dz'.$$

Заменим функцию  $\dot{I}(z')/\dot{I}(z)$  двумя начальными членами ряда Тейлора в окрестности точки  $z'=z$ :

$$\frac{\dot{I}(z')}{\dot{I}(z)} \approx 1 + \frac{1}{\dot{I}(z)} \left. \frac{d\dot{I}(z')}{dz'} \right|_{z'=z} (z' - z). \quad (2)$$

Далее, введя обозначение

$$\zeta_1(z) = \int_0^l g(z, z') dz', \quad \zeta_2(z) = \int_0^l g(z, z') (z' - z) dz'$$

и используя свойство быстрого убывания функции Грина задачи за пределами окрестности точки  $z=z'$  [1], получим:

$$\begin{aligned} F\{\dot{I}(z)\} &\approx \dot{I}(z) \int_0^l g(z, z') dz' + \frac{d\dot{I}(z)}{dz} \int_0^l g(z, z') (z' - z) dz' = \\ &= \dot{I}(z) \zeta_1(z) + \frac{d\dot{I}(z)}{dz} \zeta_2(z). \end{aligned} \quad (3)$$

Аналогично для производной:

$$\frac{dF\{\dot{I}(z)\}}{dz} = \int_0^l \frac{\partial}{\partial z} g(z, z') \dot{I}(z') dz',$$

где:

$$\frac{\partial g(z, z')}{\partial z} \equiv \beta(z, z') = \frac{(z' - z)}{\varphi^2(a)} \left[ jK \left( e^{-jK\varphi(a)} - e^{-jK\varphi(2h)} \right) - \right. \\ \left. - \varphi^{1/2}(2h) \left( e^{-jK\varphi(2h)} + e^{-jK\varphi(a)} \right) \right],$$

$$\varphi(x) = \sqrt{(z - z')^2 + x^2},$$

введя обозначения:

$$\theta_1(z) = \int_0^l \beta(z, z') dz', \quad \theta_2(z) = \int_0^l \beta(z, z') (z' - z) dz',$$

запишем:

$$\frac{dF\{\dot{I}(z)\}}{dz} \approx \dot{I}(z) \int_0^l \beta(z, z') dz' + \frac{d\dot{I}(z)}{dz} \int_0^l \beta(z, z') (z' - z) dz' = \\ = \dot{I}(z) \theta_1(z) + \frac{d\dot{I}(z)}{dz} \theta_2(z) \quad (4)$$

Подставляя (2)-(4) в (1), получим:

$$\left\{ \begin{aligned} -\frac{d\dot{U}}{dz} &= j\omega \frac{\mu}{4\pi} \left[ \zeta_1(z) - \zeta_2(z) \frac{\theta_1(z)}{\theta_2(z)} \right] \dot{I} + \\ &+ \frac{\zeta_2(z)}{\theta_2(z)} \left\{ K^2 \dot{U} - j\omega \frac{\mu}{4\pi} [g(z, l) \dot{I}(l) - g(z, 0) \dot{I}(0)] \right\} - \dot{E}_z^{ext}(z), \quad (5) \\ -\frac{d\dot{I}}{dz} &= j\omega \frac{4\pi\varepsilon}{\theta_2(z)} \dot{U} + \frac{\theta_1(z)}{\theta_2(z)} \dot{I} + \frac{g(z, l)}{\theta_2(z)} \dot{I}(l) - \frac{g(z, 0)}{\theta_2(z)} \dot{I}(0). \end{aligned} \right.$$

Уравнения (5) приближенно описывают динамику процессов в линии с учетом ее неоднородности на концах и излучения электромагнитной энергии. При этом в (5) в явном виде выделяются эквивалентные параметры линии, зависящие от частоты и координаты. Явление излучения в (5) описываются при помощи добавочных членов, которые в области низких частот становятся малыми. Система телеграфных уравнений может быть получена из системы обобщенных телеграфных уравнений (5), если использовать в (2) только нулевой член разложения в ряд Тейлора, то есть положить  $\dot{I}(z')/\dot{I}(z) \approx 1$  и, соответственно, считать линию однородной. Отметим, что полученные путем такого предельного перехода эквивалентные индуктивность

$L'(\omega)$  и емкость  $C'(\omega)$  на единицу длины центральной части конечной длиной линии совпадают с известным выражением для погонных индуктивности  $L'_0$  и емкости  $C'_0$  системы «провод над идеально проводящей поверхностью»:

$$L'_0 = L'(\omega)|_{\omega \rightarrow 0} = \frac{\mu}{2\pi} \operatorname{Re} \zeta_1(z) \Big|_{\substack{z=l/2 \\ \omega \rightarrow 0}} \rightarrow \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{2h}{a},$$

$$C'_0 = C'(\omega)|_{\omega \rightarrow 0} = 2\pi\epsilon \operatorname{Re} \theta_2^{-1}(z) \Big|_{\substack{z=l/2 \\ \omega \rightarrow 0}} \rightarrow \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{2h}{a}}, \quad h \ll l.$$

Эквивалентная емкость и индуктивность на единицу длины линии  $L'(\omega, z)$  и  $C'(\omega, z)$  зависят от частоты и координаты, причем эта зависимость от координаты обладает свойством четности относительно центра линии, что следует из четности функции Грина относительно точки  $z=z'$ . Зависимость  $L'(\omega, z)$  и  $C'(\omega, z)$  от  $z$  в области низких частот приведена на рис.1.

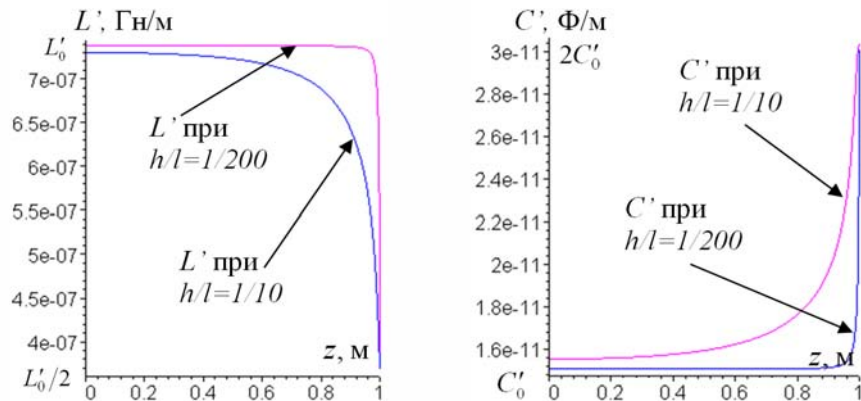


Рис.1. Зависимости погонных индуктивности и емкости линии от  $z$  в области низких частот для различных соотношений  $h/l$

Анализ свойств системы уравнений (5) позволяет условно разделить эквивалентную схему линии на три части (рис.2). Поскольку в центральной части линии функции  $\theta_1(z)$  и  $\zeta_2(z)$  становятся малыми, а  $\theta_2(z)$  и  $\zeta_1(z)$  не зависят от координаты при любых частотах, для центральной части линии можно записать более простую систему уравнений с постоянными по координате параметрами. Будем называть концевыми участками те участки линии, где система уравнений (5) имеет существенно зависящие от координаты коэффициенты при переменных. Определим длину концевых участков  $d_0$  из следующего условия:  $g(K, z, d_0)|_{K=0, z=0} < 0.01 \cdot g(0, 0, 0)$ , что обеспечивает погрешность при переходе к упрощенной системе уравнений для центральной части линии не более 1%.

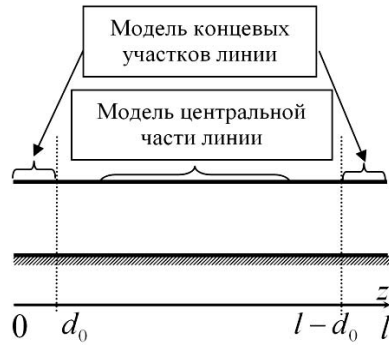


Рис.2. Модель линии с концевыми участками

Система уравнений для центральной части конечной линии совпадает по структуре с системой телеграфных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}}{dz} = -Z'(j\omega)\dot{I}(z) + \dot{E}_z^{ext}(z), & Z'(\omega) = \frac{\mu}{4\pi}\zeta_1(\omega, l/2), \\ \frac{d\dot{I}(z)}{dz} = -Y'(j\omega)\dot{U}(z), & Y'(\omega) = \frac{4\pi\epsilon}{\theta_2(\omega, l/2)}. \end{cases} \quad (6)$$

Эквивалентные параметры уравнений центральной части линии (6)  $Z'(\omega)$ ,  $Y'(\omega)$  зависят от частоты, причем в области низких частот выполняется условие  $Z'(j\omega) \approx j\omega L'_0$ ,  $Y'(j\omega) \approx j\omega C'_0$ , а в области высоких частот проявляются новые свойства, характеризующие линию как излучающую систему. Далее проводится анализ зависимостей от частоты эквивалентных параметров центральной части линии. Эквивалентное продольное сопротивление линии  $Z'(j\omega)$  можно рассматривать как  $Z'(j\omega) = R'(\omega) + j\omega L'_f(\omega)$ , где  $L'_f(\omega)$  – внешняя индуктивность системы «провод над землей», а  $R'(\omega)$  – эквивалентное сопротивление излучения. Индуктивность  $L'_f(\omega)$  системы «провод над землей» складывается из  $L'(\omega)$  – внешней индуктивности,  $L'_w(\omega)$  – внутренней индуктивности провода и  $L'_g(\omega)$  – индуктивности, определяемой потоком, замыкающимся в земле:  $L'_f(\omega) = L'(\omega) + L'_w(\omega) + L'_g(\omega)$ . Активное продольное сопротивление  $R'_f(\omega)$  системы «провод над землей» складывается из  $R'_w(\omega)$  – сопротивления провода и  $R'_g(\omega)$  – сопротивления земли, а также  $R'(\omega)$  – эквивалентного сопротивления излучения:

$$R'_f(\omega) = R'(\omega) + R'_w(\omega) + R'_g(\omega).$$

Тогда:

$$Z'_f(j\omega) = R'(\omega) + R'_w(\omega) + R'_g(\omega) + j\omega(L'(\omega) + L'_w(\omega) + L'_g(\omega)).$$

Активное продольное сопротивление линии в области низких и средних частот определяется активным внутренним сопротивлением провода и земли, а в области высоких частот эквивалентным сопротивлением излучения конечной линии. В области низких и средних частот индуктивность системы «провод над землей» определяется как внутренней индуктивностью провода и земли, так и внешней индуктивностью системы «провод над землей», а в области высоких частот только частотно-зависимым внешним сопротивлением системы «провод над землей» (рис.3). На основе системы уравнений (6) может быть получена цепная схема замещения, моделируемая как длинная линия с Т-образными звеньями, содержащими в качестве продольных сопротивлений и поперечных проводимостей двухполосники, аппроксимирующие зависимости от частоты эквивалентных параметров линии  $Z'_f(\omega)$  и  $Y'(\omega)$ .

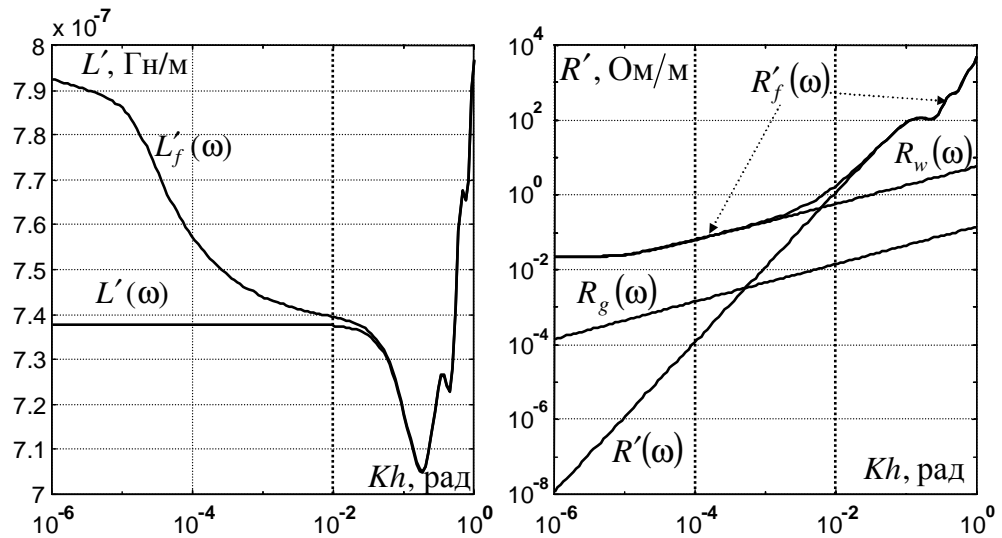


Рис.3. Частотные зависимости параметров линии

### Литература

1. Коровкин Н.В. Уравнения и схема замещения длинной линии с учетом излучения электромагнитной энергии / Н.В.Коровкин, С.В.Ткаченко // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. Вып.5. – Апатиты, 2012. – С. 7-17.
2. Tkachenko S. Electromagnetic field coupling to a line of finite length: Theory and fast iterative solution in frequency and time domains / S.Tkachenko, F.Rachidi, M.Ianoz // IEEE Trans. EMC. – 1995. – Vol.37, № 4. – P. 509-518.
3. Tkachenko S. High-frequency electromagnetic field coupling to long terminated lines / S.Tkachenko, F.Rachidi, M.Iano // IEEE Trans. EMC. – 2001. – Vol.43, № 2. – P. 117-129.
4. Nitsch J. Generalization of the full-wave transmission line theory for loaded lines with distributed excitation / J.Nitsch, S.Tkachenko, F.Rachidi // PIERS. – Beijing, 2009.

### Сведения об авторах

#### Коровкин Николай Владимирович

заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» СПбГПУ  
Россия, 195251, г.Санкт-Петербург, ул.Политехническая, д.29  
тел. (812) 552-75-72, эл. почта: nikolay.korovkin@gmail.com

**Ткаченко Сергей Владимирович**

старший научный сотрудник Государственного научно-исследовательского института Радио (НИИР)  
105064, г.Москва, ул.Казакова, д.16  
тел. (812) 552-75-72, эл.почта: nikolay.korovkin@gmail.com

**Кочетов Сергей Всеволодович**

старший научный сотрудник кафедры «Теоретические основы электротехники» СПбГПУ  
Россия, 195251, г.Санкт-Петербург, ул.Политехническая, д.29  
тел. (812) 552-75-72, эл. почта: nikolay.korovkin@gmail.com

**Ефимов Борис Васильевич,**

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

УДК 621.311

**Б.В.Ефимов, Н.И.Гумерова**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ГРОЗОВЫХ ВОЛН В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ  
С УЧЕТОМ СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ОПОР, КОРОНЫ  
НА ПРОВОДАХ И ПОТЕРЬ В ЗЕМЛЕ\***

**Аннотация**

На основе метода бегущих волн впервые разработан алгоритм расчета деформации импульсов со спектром от десятков герц до десятков мегагерц в многопроводных воздушных линиях электропередачи с учетом потерь, вызванных влиянием скин-эффекта в земле. Разработана методика включения в общий алгоритм схем замещения опор и их заземлений с учетом влияния реактивных элементов. Выполнен анализ совместного влияния потерь в земле и импульсной короны на проводах на формирование импульсов до и после перекрытия гирлянд изоляторов на опоре.

**Ключевые слова:**

*линия электропередачи, грозовые волны, потери в земле, импульсная корона, схема замещения опоры.*

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

**SIMULATION OF LIGHTNING WAVES DEFORMATION IN VIEW OF THE JOINT EFFECT  
OF TOWER DESIGNS, CORONA DISCHARGE AND GROUND LOSSES**

**Abstract**

Based on the method of traveling waves for the first time an algorithm for calculating the deformation of pulses with a spectrum ranging from tens of Hz to tens of MHz in multi-wire overhead lines for the losses caused by the influence of the skin effect in the ground, has been developed. Methods of inclusion of tower equivalent circuits in the general algorithm taking into account grounding impedance are worked out. Analysis of the combined effect of the ground losses and impulse corona on the wires on the formation of impulses before and after the tower insulator failure is carried out.

**Keywords:**

*power transmission line, lightning waves, ground losses, impulse corona, tower equivalent circuits.*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-00690).

Настоящая статья является продолжением работ авторов по созданию быстродействующего алгоритма расчета деформации фронтов грозových волн в линиях электропередачи на подходах к подстанциям [1-8]. Рассматриваются длины пробега волн не более единиц километров. 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 [9]. 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 отдельно  $Y$ - и  $Z$ -узлов рассмотрен в [9]. Оптимизация расстановки узлов при совместном учете короны и потерь в земле рассмотрена ниже.

Кроме того, в данной статье рассматривается влияние опор линии, в местах установки которых заземляются тросы, и вводится возможность перекрытия линейной изоляции. После перекрытия гирлянд на формирование формы волны оказывают влияние индуктивности участков опор и сопротивления их заземления. При этом возникает резкий срез напряжения при распространении волны по проводам после прорыва молнии. На проводе появляется волна с очень крутым фронтом после поражения молнией опор и тросов. Для районов с высоким удельным сопротивлением грунта ( $\rho$ ) характерны значения сопротивлений заземления опор  $R_{op} \geq 100$  Ом. Если индуктивность опоры  $L_{op} \approx 10$  мкГн, то после перекрытия гирлянды на проводе формируется волна с постоянной времени  $\tau_0 = L_{op} / R_{op} \leq 0.1$  мкс. Можно отметить, что резкие скачки напряжения из-за перекрытия линейной изоляции на первых опорах от подстанции более вероятны, чем просто удары молнии с очень короткими фронтами в те же пролеты линии. Длительность импульса напряжения на проводах при больших сопротивлениях опор будет определяться относительно большим остаточным напряжением на них и может составлять десятки и сотни микросекунд.

В связи с этим в данной работе рассмотрены вопросы моделирования частотно-зависимых потерь в земле схемами с постоянными параметрами в более широком диапазоне частот, чем описано в [8]. В этой работе подробно рассмотрены модели, состоящие из трех последовательно включенных  $RL$ -звеньев с параллельно включенными  $R$  и  $L$ . Такие схемы дают хорошее приближение к исходным частотным зависимостям добавок к продольным сопротивлениям линии, возникающим из-за проникновения электромагнитного поля в землю, в диапазоне изменения частот не более чем на две декады, например, от  $10^4$  до  $10^6$  Гц или от  $10^3$  до  $10^5$  Гц. В первом диапазоне достаточно хорошо моделируется процесс искажения микросекундных фронтов грозových волн, во втором – удлинение спадов волн. Поскольку для целей грозозащиты подстанций критически важно, возможно, более точное моделирование фронтов, то обычно рассматривался первый вариант. При пробегах волн в сотни метров и единицы километров можно пренебречь влиянием затухания волн в междупроводных каналах и учитывать потери только в канале «все провода – земля». Как подробно исследовано в [9], это означает, что все добавки из-за проникновения поля в землю к собственным и взаимным сопротивлениям многопроводной линии равны друг другу и могут быть выражены [5]:

$$Z^{(Q)} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{2e^{-2\lambda h}}{\lambda + A(\lambda)} d\lambda, \quad (1)$$

где для однослойной земли и при пренебрежении токами смещения в грунте:

$$A(\lambda) = \sqrt{\lambda^2 + \frac{j\omega\mu_0}{\rho}}; \quad (2)$$

для двухслойной земли с учетом токов смещения в грунте:

$$A(\lambda) = \frac{\eta_1 \left( \frac{\eta_1}{\eta_2} + \text{cth} \eta_1 d \right)}{1 + \frac{\eta_1}{\eta_2} \cdot \text{cth} \eta_1 d}; \quad (3)$$

$$\eta_1 = \sqrt{\lambda^2 + \frac{j\omega\mu_1}{\rho_1} + \omega^2(\mu_0\epsilon_0 - \mu_1\epsilon_1)};$$

$$\eta_2 = \sqrt{\lambda^2 + \frac{j\omega\mu_2}{\rho_2} + \omega^2(\mu_0\epsilon_0 - \mu_2\epsilon_2)},$$

где  $h$  – средняя высота подвеса некоторого эквивалентного провода, используемая только для расчета потерь в земле;  $d$  – толщина верхнего слоя грунта;  $\rho_1, \mu_1, \epsilon_1$  – удельное сопротивление, магнитная проницаемость и диэлектрическая постоянная грунта в верхнем слое;  $\rho_2, \mu_2, \epsilon_2$  – удельное сопротивление, магнитная проницаемость и диэлектрическая постоянная грунта остального грунта.

Поскольку вычисления  $Z^{(3)}$  при однослойном грунте можно выполнять с помощью рядов [10], а для двухслойного грунта приходится применять численное интегрирование вещественной и мнимой частей подынтегральных выражений в (1), трудоемкость счета с использованием (2) и (3) существенно различается. Несмотря на это, опыт использования более общего выражения (3) показал, что в целом подробное моделирование потерь в земле для целей расчета грозозащиты подстанций на современных компьютерах практически не влияет на общую трудоемкость счета. Все расчеты, приведенные далее, выполнены для однослойного грунта, хотя программная реализация осуществлена для модели, состоящей из двух слоев. Далее просто полагается равенство параметров верхнего и нижнего слоя.

Методика нахождения параметров  $RL$ -звеньев описана в [9]. Находится решение системы нелинейных уравнений вида:

$$\text{Re}Z(j\omega_k) + j\text{Im}Z(j\omega_k) = \sum_{i=1}^m \frac{j\omega_k L_i R_i}{R_i + j\omega_k L_i}, \quad k=1, 2, \dots, m \quad (4)$$



для некоторых заданных значений  $\omega_k$  ( $m$  – число опорных частот и одновременно число звеньев). Необоснованное увеличение  $m$  усложняет алгоритм и увеличивает трудоемкость счета. Практика расчетов показала, что оптимальным для данной задачи является моделирование исходной зависимости в логарифмическом масштабе по частоте с шагом на целую декаду. При меньшем шаге сужается диапазон частот, в котором моделируются параметры. При большем шаге возрастают погрешности моделирования при промежуточных частотах. В [8] были выбраны три опорные частоты  $f_1=10^4$  Гц,  $f_2=10^5$  Гц и  $f_3=10^6$  Гц и определены параметры трех звеньев для  $\rho=10000$  Ом·м и  $h=10$  м. Кроме того, были выполнены контрольные расчеты с четырехзвенной схемой замещения с добавлением опорной частоты  $f_4=10^7$  Гц. Для волны с фронтом  $\tau_0 \approx 0.25 \mu\text{с}$  был сделан вывод о достаточности выбора верхней опорной частоты 1 МГц при расчете процессов в линии длиной 3 км. Действительно, синусоидальные сигналы с частотами выше 1 МГц в допущениях, принятых при выводе формулы (1) для скин-эффекта в земле, при распространении по линии быстро затухают. Спектры волн с крутыми в начале линии фронтами существенно сужаются на первых сотнях метров, и диапазона частот от 10 кГц до 1 МГц оказывается достаточно для практически полного совпадения расчетов частотным и волновым методами [8].

Однако этого недостаточно для моделирования процессов в первых от подстанции пролетах линии при наличии срезов напряжений или при экстремально малых фронтах токов молнии. На рис.1 приведены результаты решения системы (6) с помощью процедуры Minerr() системы Mathcad, которая в данном случае работает очень эффективно.

Опорные частоты	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц
3 звена			$L_1=282$ мкГн $\tau=13.1$ мкс $R_1=21.5$ Ом	$L_2=238$ мкГн $\tau=0.88$ мкс $R_2=269$ Ом	$L_3=299$ мкГн $\tau=0.043$ мкс $R_3=6930$ Ом	
				$L_1=263$ мкГн $\tau=1.39$ мкс $R_1=189$ Ом	$L_2=189$ мкГн $\tau=0.10$ мкс $R_2=1888$ Ом	$L_3=147$ мкГн $\tau=0.006$ мкс $R_3=24497$ Ом
4 звена			$L_1=277$ мкГн $\tau=13.7$ мкс $R_1=20.1$ Ом	$L_2=220$ мкГн $\tau=1.03$ мкс $R_2=213$ Ом	$L_3=181$ мкГн $\tau=0.093$ мкс $R_3=1957$ Ом	$L_4=146$ мкГн $\tau=0.006$ мкс $R_4=24951$ Ом
5 звеньев		$L_1=281$ мкГн $\tau=136$ мкс $R_1=2.07$ Ом	$L_2=233$ мкГн $\tau=10.2$ мкс $R_2=22.9$ Ом	$L_3=211$ мкГн $\tau=0.95$ мкс $R_3=221$ Ом	$L_4=179$ мкГн $\tau=0.090$ мкс $R_4=1978$ Ом	$L_5=145$ мкГн $\tau=0.006$ мкс $R_5=25093$ Ом
6 звеньев	$L_1=284$ мкГн $\tau=1353$ мкс $R_1=0.21$ Ом	$L_2=239$ мкГн $\tau=101$ мкс $R_2=2.36$ Ом	$L_3=225$ мкГн $\tau=9.44$ мкс $R_3=23.8$ Ом	$L_4=209$ мкГн $\tau=0.93$ мкс $R_4=224$ Ом	$L_5=178$ мкГн $\tau=0.090$ мкс $R_5=1985$ Ом	$L_6=145$ мкГн $\tau=0.006$ мкс $R_6=25137$ Ом

Рис.1. Параметры RL-звеньев на 1 км длины линии для  $\rho=10000$  Ом·м и высоте подвеса провода  $h=10$  м

Начальные приближения для всех  $R$  и  $L$  задавались по [8]. Подобраны параметры трехзвенной схемы для диапазона частот от 10 кГц до 1 МГц, использованного в [8], и в диапазоне частот, сдвинутом в сторону увеличения на порядок. Далее при фиксированном верхнем пределе 10 МГц выполнено последовательное увеличение числа звеньев от 3 до 6. Максимальный диапазон опорных частот для 6 звеньев составил 5 декад, что с большим запасом перекрывает диапазон спектров частот, значимых для формирования параметров грозовых импульсов на ВЛ и подстанциях (фронтов, амплитуд, спадов аperiodических волн, возможных колебательных составляющих, возникающих из-за многократных отражений волн в местах неоднородностей линий и ошинок).

Кроме использования процедуры `Minerr()` системы `Mathcad` для целей включения в общий алгоритм расчета деформации волн в многопроводной линии применялась стандартная подпрограмма `DNEQNF` из математической библиотеки `IMSL`. Вообще говоря, задача нахождения точного решения нелинейной системы (4) не является тривиальной. Необходимо найти значения активных сопротивлений, различающихся более чем на 5 порядков, что при относительно малых изменениях индуктивностей приводит к такому же различию постоянных времени звеньев. Как показала практика расчетов, для достаточно точного нахождения решения системы (4) и совпадения с результатами счета по обеим программам необходимо использование программ двойной точности (первая буква  $D$  в названии подпрограммы) даже на компьютерах с 64-разрядным процессором. Для 6 звеньев подпрограмма `DNEQNF` работает устойчиво для удельных сопротивлений грунта от 1 до  $10^5$  Ом·м при совпадении со счетом по `Minerr()` в пределах 5-7 значащих цифр для параметров всех звеньев. При шаге по частоте на декаду случаи зависания компьютера (`Minerr`) и выхода на тотальные ошибки (`DNEQNF`) не отмечены. Такие случаи происходили для меньшего количества звеньев при варьировании диапазона моделируемых частот, а также для шестизвенной  $RL$ -схемы при сужении диапазона частот. Поэтому дальнейшее изложение ориентировано на учет влияния проникновения поля в грунт с помощью  $RL$ -схем, состоящих из шести звеньев при логарифмическом шаге по частоте 10, начальной (первой) частоте 100 Гц, а также при удельном сопротивлении грунта  $\rho=10000$  Ом·м, типичном для Кольско-Карельского региона и наиболее показательном для сопоставления влияния различных факторов на искажение фронтов грозовых волн.

На рисунке 2 приведено сопоставление исходных частотных зависимостей вещественных и мнимых частей сопротивлений, рассчитанных по (1), и вещественных и мнимых частей сопротивлений шестизвенных  $RL$ -схем. На всех четырех графиках задан логарифмический масштаб по частоте. По сопротивлениям на рис.2а и б задан также логарифмический масштаб. Видно, что в пределах всего заданного диапазона частот в этом масштабе кривые практически наложены друг на друга. При уменьшении частоты ниже 100 Гц происходит резкое расхождение активных сопротивлений. Расхождения на частотах выше последней из опорных частот наиболее наглядно видны при использовании линейного масштаба по сопротивлениям (рис.2в и г). Исходные кривые идут резко вверх, а вещественные части сопротивлений цепочек стремятся к горизонтали на уровне активного сопротивления последнего звена, т.е. к 25137 Ом. Мнимые части сопротивлений цепочек на очень высоких частотах стремятся к нулю.

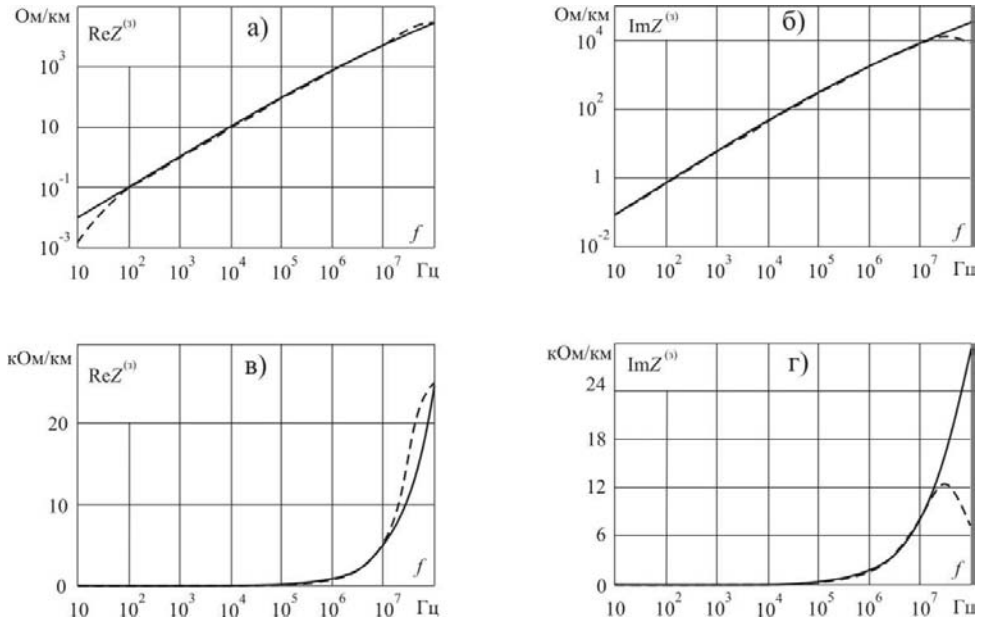


Рис.2. Семь декад частотных зависимостей составляющих продольного сопротивления контура «провод – земля» на 1 км длины линии для  $\rho=10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и высоте подвеса провода  $h=10 \text{ м}$

На графиках, охватывающих 7 декад по изменению частоты не видно погрешностей моделирования в промежуточных (между опорными частотами) точках. В самих опорных точках совпадение расчетов по (1) и  $RL$ -модели с помощью алгоритмов Minerr() и DNEQNF достигается с точностью 8 значащих цифр для каждой из точек. При шаге по опорным частотам на декаду в промежуточных точках погрешности моделирования достигают заметных значений. Для примера на рис.3 приведены изменения сопротивлений в диапазоне от 100 кГц до 1 МГц.

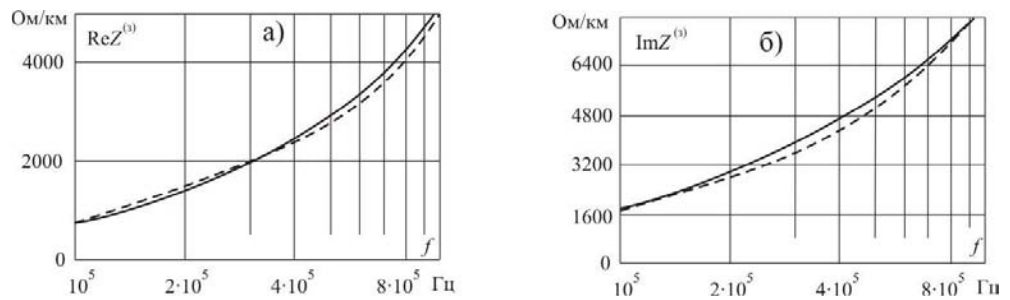


Рис.3. Одна декада частотных зависимостей составляющих продольного сопротивления контура «провод – земля» на 1 км длины линии для  $\rho=10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и высоте подвеса провода  $h=10 \text{ м}$

Видно заметное расхождение вещественных частей при частотах около 200 и 700 кГц. Наибольшее расхождение мнимых частей происходит на частотах 300-500 кГц.

В таблице даны максимальные отличия между исходными сопротивлениями и сопротивлениями модели, отнесенные к текущему значению исходных сопротивлений.

Таблица

Относительные величины расхождений между  $Z^{(3)}$  и сопротивлениями  $RL$ -модели

№ п/п	Диапазон частот	$\Delta \text{Re}Z$ (%)	$\Delta \text{Im}Z$ (%)	$\Delta  Z $ (%)
1	10 – 100	83.7	8.05	12.3
2	100 – 1000	10.9	2.52	2.59
3	1000 – $10^4$	6.79	2.36	2.34
4	$10^4$ – $10^5$	5.99	2.87	2.80
5	$10^5$ – $10^6$	6.02	4.16	3.95
6	$10^6$ – $10^7$	7.83	8.14	7.24
7	$10^7$ – $1.5 \cdot 10^7$	15.3	1.19	8.3
8	$1.5 \cdot 10^7$ – $10^8$	41.5	78.0	60.9

Как видно из табл., погрешности моделирования имеют вполне значимые величины. Их можно уменьшить путем сужения диапазона опорных частот при сохранении числа звеньев. Так, при переходе от логарифмического шага 10 к логарифмическому шагу 4 и первой опорной частоте  $f_1=10$  кГц ( $f_6=1024$  кГц), максимальные погрешности моделирования снижаются до 2.67% по вещественной части, до 0.41% по мнимой части и до 0.65% по модулю сопротивлений. Однако при этом диапазон изменения опорных частот составляет всего две декады, что может оказаться недостаточным для расчетов процессов при крутых фронтах волн. Приведенное далее сравнение расчетов по методу бегущих волн с использованием  $RL$ -моделей и частотным методом, использующим непосредственно выражения (1), показывают, что погрешности моделирования, приведенные в табл., являются вполне допустимыми.

Теперь перейдем к более точному, чем использовалось ранее в [8], способу включения  $RL$ -модели в общий алгоритм расчета распространения волн в многопроводной линии.

Рассмотрим матричное телеграфное уравнение для убыли напряжений на проводах при синусоидальной форме сигнала с частотой  $f$  и, соответственно, круговой частотой  $\omega = 2\pi \cdot f$ . При длине линии не более единиц километров с большой степенью точности можно пренебречь внутренним сопротивлением проводов [10]. Тогда в правую часть уравнения будет входить сумма двух составляющих:

$$-\frac{\partial U(j\omega)}{\partial x} = Z^{(\hat{A})} \cdot I(j\omega) + Z^{(\odot)} \cdot I(j\omega) = j\omega \cdot L \cdot I(j\omega) + Z^{(\odot)} \cdot I(j\omega), \quad (5)$$

где  $U(j\omega)$  – вектор напряжений на проводах (и тросах);  $I(j\omega)$  – вектор токов в проводах (и тросах);  $Z^{(\hat{A})}$  – квадратная матрица собственных и взаимных сопротивлений линии без потерь (чисто индуктивные сопротивления воздушной среды вокруг проводов с учетом влияния идеально проводящей земли);  $L$  – квадратная матрица собственных и взаимных индуктивностей линии без потерь, равная

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} N; \quad (6)$$

$N$  – квадратная матрица, названная в [1] матрицей логарифмов линии;  $Z^{(\odot)}$  – квадратная матрица собственных и взаимных вносимых сопротивлений, вызванных изменением геометрии поля, проникающего в проводящий грунт.

При принятом выше допущении о равенстве всех элементов  $Z^{(\odot)}$  скалярной величине  $Z^{(\odot)}$  имеем [9]:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} U_1(j\omega) \\ \dots \\ U_n(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^{(\hat{A})}_{11} & \dots & Z^{(\hat{A})}_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ Z^{(\hat{A})}_{n1} & \dots & Z^{(\hat{A})}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1(j\omega) \\ \dots \\ I_n(j\omega) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z^{(C)} \cdot \sum_{i=1}^n I_i(j\omega) \\ \dots \\ Z^{(C)} \cdot \sum_{i=1}^n I_i(j\omega) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Алгебраическая сумма комплексов токов в проводах представляет собой ток, текущий в контуре «все провода – земля», а равенство всех элементов  $Z^{(C)}$  означает, что пренебрегается изменением параметров междупроводных каналов распространения сигналов вдоль линии [9]. При этом оказывается, что дополнительное изменение напряжения, вызванное вторым слагаемым в (7), одинаково для всех проводов и тросов.

Тогда для расчета влияния конечной проводимости земли в канале «все провода – земля» можно перейти от многопроводной линии (рис.4а) к расчету процессов в эквивалентной однопроводной линии без потерь (рис.4б) с периодически включенными  $Z$ -узлами, состоящими из  $RL$ -звеньев. По этой линии течет суммарный ток во всех проводах исходной линии.

Используя правило эквивалентной волны [9], можно прийти к схеме с сосредоточенными параметрами. Волновое сопротивление такой линии ( $Z_w$ ) и источники э.д.с., эквивалентирующие волны, приходящие справа ( $u_{П}$ ) и слева ( $u_{Л}$ ) к  $Z$ -узлу, определяются по [9]. Общее падение напряжения на продольно включенном  $Z$ -узле будет определяться суммой удвоенных эквивалентных волн. Обозначим эту сумму  $u$  (рис.4в).

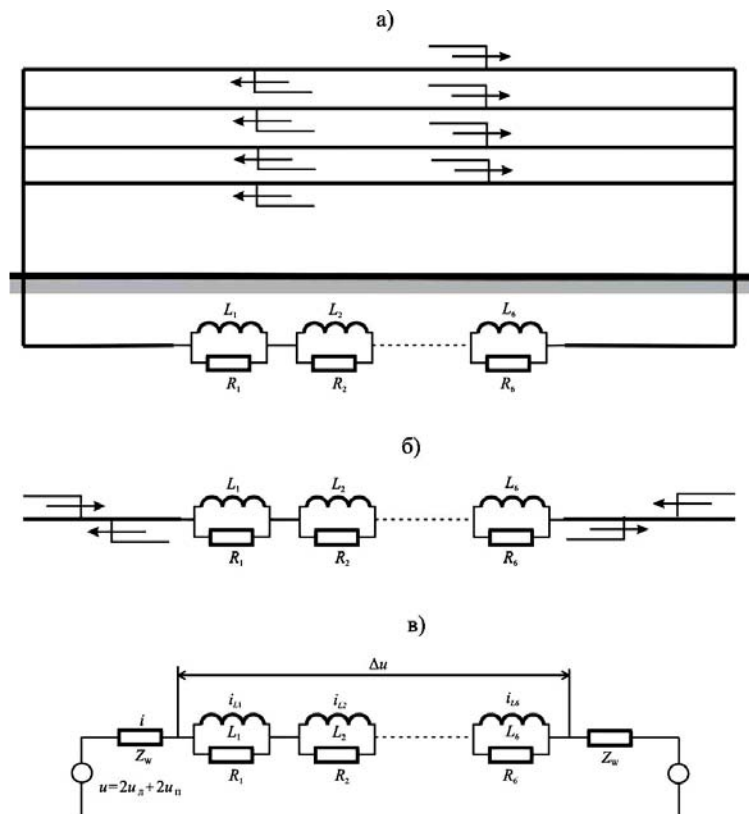


Рис.4. Варианты схем замещения для расчета влияния земли на деформацию волн в канале «все провода – земля»

В [8] полагалось, что  $Z$ -узлы расположены так часто, что активные сопротивления, рассчитанные на длину соответствующего участка, много меньше  $Z_w$ . Тогда можно считать, что суммарный ток не зависит от наличия  $RL$ -звеньев, т.е. перейти от схем замещения участка линии с источниками э.д.с. к схемам с источниками тока. При этом процессы в каждом звене можно считать независимо от наличия остальных. Реально это можно сделать для моделирования процессов до 1 МГц. Действительно, суммарное активное сопротивление трех цепочек в этом случае составляет около 7 кОм/км или 7 Ом/м. Для линии 110 кВ без тросов  $Z_w$  составляет примерно 200 Ом. В соответствии с рис.4 последовательно с  $RL$ -звеньями включены два эквивалентных волновых сопротивления  $Z_{wэ}$ , т.е. 400 Ом. Тогда при шаге по  $Z$ -узлам  $\Delta l_z=5$  м суммарное сопротивление звеньев составит менее 10% от  $2Z_w$ . А это и есть критерий допустимости перехода к источнику тока [9]. При шаге по длине линии  $\Delta l=1$  м (характерном для расчета волновых процессов в схемах замещения подстанций)  $Z$ -узлы нужно расставлять не реже чем в каждом пятом узле. Это достаточно жесткое, но выполнимое условие. При моделировании процессов в частотном диапазоне до 10 МГц суммарное активное сопротивление составляет примерно 27 кОм/км или 27 Ом/м, т.е. при тех же условиях вся линия должна состоять только из  $Z$ -узлов, что невыполнимо, поскольку нужно иметь возможность учета влияния короны и неоднородностей линии. Следовательно, нужно кратно уменьшать шаг по длине линии (и соответственно по времени), что неоправданно увеличивает трудоемкость счета.

Можно резко снизить требования к шагу расчета, рассчитывая переходный процесс непосредственно в схеме с источником напряжения (рис.4в). Для схемы, включающей  $n$  звеньев, можно записать:

$$u = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + L_1 \frac{di_{L2}}{dt} + \dots + L_1 \frac{di_{Li}}{dt} + \dots + L_1 \frac{di_{Ln}}{dt} + 2Z_w i, \quad (8)$$

где  $i_{Li}$  – ток в индуктивности  $i$ -го звена;  $i$  – ток, текущий в  $Z_w$ .

В (8) входит неизвестный ток  $n+1$ .

В каждом звене сумма токов в индуктивности  $i_{Li}$  и активном сопротивлении  $i_{Ri}$  равна  $i$ . Используя равенство напряжений на каждой из  $L_i$  и соответствующем  $R_i$ , получим:

$$i = i_{Li} + \frac{L_i}{R_i} \frac{di_{Li}}{dt} \quad (9)$$

Подставляя последовательно в (8) выражение (9) с разными численными значениями  $i=1, 2, \dots, n$ , можно прийти к системе из  $n$  уравнений с  $n$  неизвестными токами в индуктивностях:

$$\begin{bmatrix} u \\ u \\ \dots \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{2Z_w}{R_1}\right)L_1 & L_2 & \dots & L_n \\ L_1 & \left(1 + \frac{2Z_w}{R_2}\right)L_2 & \dots & L_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_1 & L_2 & \dots & \left(1 + \frac{2Z_w}{R_n}\right)L_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{L1}}{dt} \\ \frac{di_{L2}}{dt} \\ \dots \\ \frac{di_{Ln}}{dt} \end{bmatrix} + 2Z_w \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ \dots \\ i_{Ln} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Введем обозначения:  $A_1$  – матрица, стоящая перед вектором производных токов;  $U$  – скалярный вектор напряжений;  $I_L$  – вектор токов. Тогда (10) запишется:

$$U = A_1 \cdot \frac{dI_L}{dt} + 2Z_w I_L. \quad (11)$$

Далее будем полагать, что схема рис.4в включается на постоянное напряжение  $u$ . Преобразуя (11), имеем:

$$\frac{1}{2Z_w} A_1 \frac{dI_L}{dt} + I_L = \frac{1}{2Z_w} U; \quad A \frac{dI_L}{dt} + I_L = I_{\text{онб}}, \quad (12)$$

где  $I_{\text{онб}}$  – скалярный вектор, состоящий из одинаковых элементов, равных установившемуся току в схеме рис.4в.

Будем аппроксимировать внешнее воздействие в схеме рис.4в (сумму падающих волн и установившийся ток) прямоугольными столбиками постоянной высоты в пределах каждого шага расчета  $\Delta t$ . Считаем также, что по результатам расчета на предыдущем ( $k$ -м) шаге определен вектор  $I_{Lk}$ . Тогда в полной аналогии с решением одного дифференциального уравнения [11] для системы (12) можно записать:

$$I_{Lk+1} = K_2 I_{\text{онб}k+1} + K_1 I_{Lk}, \quad (13)$$

где  $I_{Lk+1}$  – вектор токов в  $n$  индуктивностях схемы рис.4в в конце текущего шага расчета;  $I_{\text{уст}k+1}$  – значение установившегося тока на текущем шаге;  $K_1 = W \cdot e^{-\Lambda \Delta t} \cdot W^{-1}$  – квадратная матрица, определяющая процесс спада токов в индуктивностях при отсутствии внешнего воздействия за время  $\Delta t$ ;  $K_2 = E - K_1$  – квадратная матрица, определяющая процесс нарастания токов в индуктивностях при постоянном внешнем воздействии за время  $\Delta t$  и нулевых начальных условиях;  $E$  – единичная матрица;  $W$  – квадратная матрица, состоящая из расположенных по столбцам собственных векторов (СВ) матрицы  $A$  в (12);  $\Lambda$  – диагональная матрица собственных значений (СЗ) матрицы  $A$ .

Использование процедур Eigenvals() и Eigenvecs() системы Mathcad, а также EVCGRG из математической библиотеки IMSL, в данном случае полностью решает проблему нахождения СЗ и СВ вещественной матрицы  $A$ .

При высоком удельном сопротивлении грунта и относительно редкой расстановке  $Z$ -узлов постоянные времени, определенные для схемы рис.4в и рассчитанные для каждого звена по отдельности, могут различаться в несколько раз. Так, для четырехзвенной схемы из рис.1 имеем (мкс):

$$\tau_1 = 13.7; \tau_2 = 1.03; \tau_3 = 0.093; \tau_4 = 0.0058.$$

Расчет СЗ в схеме рис.4в при расстановке Z-узлов через 100 м,  $\rho=10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и  $Z_w=200 \text{ Ом}$  дает (мкс):

$$\tau_1 = 13.8; \tau_2 = 1.09; \tau_3 = 0.148; \tau_4 = 0.0267.$$

Совпадение двух первых знаков в постоянной времени четвертой цепочки получается при расстановке Z-узлов не реже, чем через десятые доли метра, что недопустимо мало. Поэтому учет влияния конечного значения волнового сопротивления линии при расчете деформации волн с очень крутыми фронтами необходим.

Существенно то, что  $\mathbf{K}_1$  и  $\mathbf{K}_2$  в процессе счета с постоянным шагом по времени и координате вдоль линии не изменяются. Их можно вычислить один раз после определения параметров  $RL$ -звеньев, но до начала циклов расчета распространения волн. Кроме того, можно учесть, что все элементы вектора  $\mathbf{I}_{\text{цикл}+1}$  равны друг другу. Тогда можно заранее просуммировать построчно элементы матрицы  $\mathbf{K}_2$ , превратив ее в вектор  $\mathbf{K}'_2$ . Поэтому первое слагаемое в (13) превращается в произведение вектора  $\mathbf{K}'_2$  на скаляр  $i_{\text{цикл}+1}$ .

Для вычисления второго слагаемого нужно умножить матрицу на вектор. При большом числе звеньев именно это умножение и определяет трудоемкость всего учета потерь в земле методом бегущих волн.

Для расчета преломленных и отраженных волн в Z-узле нужно определить падение напряжения на всех звеньях. При наличии фактически аналитического решения для токов в индуктивностях, напряжение на них проще всего найти путем вычисления производных от (13) по времени и их умножения на соответствующие  $L_i$ . Имеем:

$$\mathbf{U}_{L_{k+1}} = \mathbf{L}(\mathbf{W} \cdot \Lambda \cdot e^{-\Lambda \Delta t} \cdot \mathbf{W}^{-1})(\mathbf{I}_{\text{цикл}+1} - \mathbf{I}_{L_k}) = \mathbf{K}_3(\mathbf{I}_{\text{цикл}+1} - \mathbf{I}_{L_k}), \quad (14)$$

где  $\mathbf{L}$  – диагональная матрица индуктивностей  $RL$ -звеньев.

Поскольку в дальнейшие расчеты входит только суммарное напряжение на всех звеньях, можно просуммировать все строки в (14) и определить общее падение напряжения в Z-узле:

$$\Delta u_{k+1} = \sum_{i=1}^n u_{L_{k+1},i} = \mathbf{K}'_3(\mathbf{I}_{\text{цикл}+1} - \mathbf{I}_{L_k}), \quad (15)$$

где  $\mathbf{K}'_3$  – вектор, полученный из  $\mathbf{K}_3$  путем сложения элементов каждого столбца.

Теперь вычисление падения напряжения на всех звеньях сводится к поэлементному произведению составляющих вектора  $\mathbf{K}'_3$  и вектора разностей установившегося тока и токов в индуктивностях на предыдущем шаге расчета.

Можно показать [9], что в каждом проводе линии (и в каждую сторону распространения волн) преломленные волны после прохождения Z-узла равны падающим волнам за вычетом  $0.5\Delta u_{k+1}$ , а отраженные просто равны  $0.5\Delta u_{k+1}$ .

Таким образом, полученное выше решение для произвольного числа  $RL$ -звеньев представляет собой эффективный алгоритм расчета потерь в канале «все провода – земля» с учетом конечного значения волнового сопротивления этого канала и грозовых волн, имеющих спектр значимых составляющих от сотен герц до десятков мегагерц.



Далее волновые процессы рассмотрены на примере линии с горизонтальным расположением проводов [8]. Провода подвешены на высоте 10 м с расстоянием между соседними проводами 4 м. Радиус проводов 1 см. Удельное сопротивление грунта 10 кОм·м. Шаг по длине в расчетах волновым методом (ВМ) составляет 1 м, что соответствует шагу по времени 3.33 нс. Узлы, учитывающие влияние земли, были расставлены через 15 м.

Кроме того, волновой процесс в этой линии рассчитывался на совершенно другой основе [5], частотным методом (ЧМ), в диапазоне частот от 100 Гц до 100 МГц.

В отличие от [8] волна на входе отрезка линии при  $x=0$  задавалась с очень крутым фронтом по формуле  $u(t) = U_j [\exp(-0.0001t) - \exp(-25t)]$ , где  $t$  – время, мкс;  $U_j$  – амплитуда отрицательной волны напряжения, которая во всех расчетах, приведенных далее, принималась равной 600 кВ.

В диапазоне времен от 1 до 10 мкс волна имеет почти прямоугольный вид. Постоянная времени нарастания фронта составляет 40 нс. Тогда за первые 0.05 мкс напряжение нарастает до  $0.73U_j$ , а за одну десятую микросекунды до  $0.9U_j$ . Это соответствует предельно крутым фронтам грозových перенапряжений на воздушных линиях.

На рисунках 5 и 6 приведены примеры расчета волнового процесса при подаче волны по всем трем проводам и по крайнему проводу.

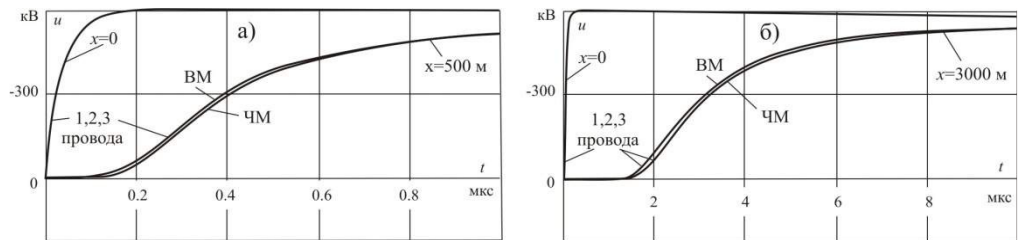


Рис.5. Деформация волн из-за потерь в земле при поражении молнией всех проводов линии (канал «все провода – земля»)

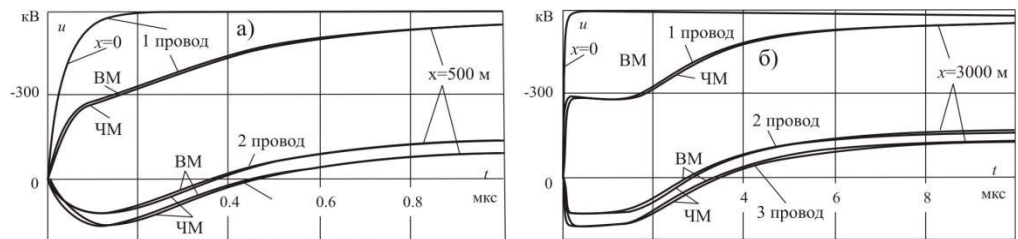


Рис.6. Деформация волн из-за потерь в земле при поражении молнией крайнего (первого) провода линии (все волновые каналы)

Влияние короны заблокировано. В первом случае действует только один волновой канал «все провода – земля». Видно, что этот канал моделируется хорошо. Расчеты волновым и частотным методом практически совпадают как для фронтных частей импульсов при малых пробегах по линии (рис.5а), так и при пробегах, больших чем обычная длина опасной зоны подходов линий к подстанциям (рис.5а). Следует заметить, что частотный метод дает несколько различную деформацию волн на среднем и крайних проводах. Затухание фронта волны на среднем проводе чуть меньше, чем на крайних проводах. Однако для рассматриваемого случая это различие укладывается в толщину линии на рисунках. Волновой метод в описываемом варианте дает строго одинаковую деформацию волн по всем трем фазам. При подаче волны

по одному проводу существенную роль играют межфазные каналы, влияние которых подробно исследовано в [6]. Видно, что и в этом случае совпадение расчетов по двум методам очень хорошее. В целом можно отметить, что и для предельно крутых фронтов токов молнии ВМ дает высокую точность учета потерь в земле при малой трудоемкости счета. При пробеге волнами более одного километра без существенной потери точности расчета формы волны на пораженном проводе Z-узлы можно расставлять через 30 и даже 60 м. Причины чуть меньшей деформации волн при расчетах ВМ по сравнению с ЧМ подробно не анализировались, но можно предположить, что это связано с влиянием межфазных каналов на параметры канала «все провода – земля». Это влияние можно учесть в ВМ по методике [8].

На рисунке 7 дан расчет волновым методом деформации волны на крайнем проводе только из-за действия короны при пробеге тех же 500 м (рис. 7а) и 3000 м (рис. 7б).

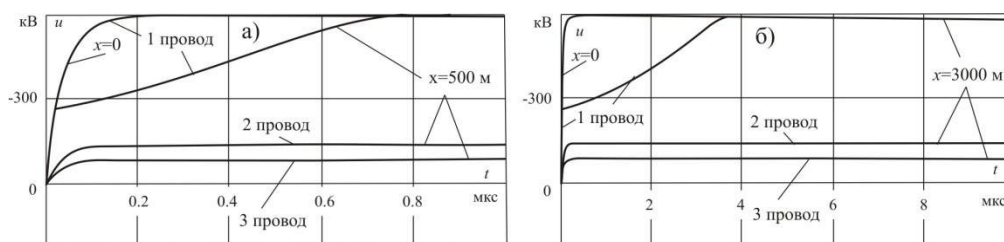


Рис.7. Деформация волн из-за потерь на корону при поражении молнией крайнего (первого) провода линии

Влияние короны учитывалось полностью в соответствии с методикой [7]. Изолированные параллельные провода с нулевым собственным зарядом не оказывают влияние на процесс коронирования. Напряжения на этих проводах определяются только граничными условиями при  $x=0$ . Расчет соответствует изложенному в [7], где приводится сопоставление результатов счета с другими методами. Крутизна фронта здесь не играет существенной роли. Нарастание волны на пораженном проводе никак не проявляется на остальных проводах. Этот факт подробно проанализирован в [3]. Узлы, учитывающие влияние короны (Y-узлы), расставлялись с той же частотой, что и Z-узлы, т.е. также через 15 м со сдвигом на один узел друг относительно друга.

Напряжение начала короны на одиночном проводе радиусом 1 см, подвешенном на высоте 1 м, составляет  $U_{КР1} = -242.3$  кВ [7]. Погонный критический заряд на проводе  $q_{КР1} = -1.77$  мкКл/м.

Наконец, на рис.8 приведен расчет совместного влияния обоих факторов.

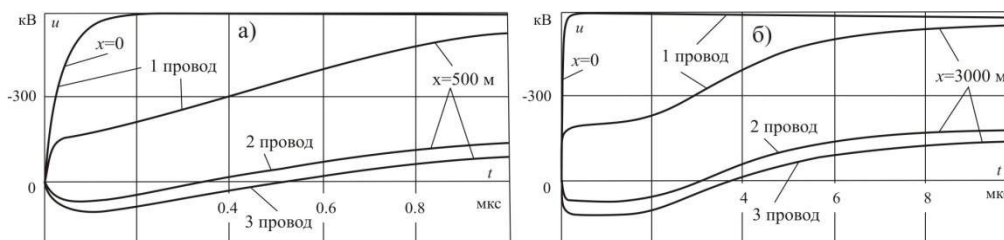


Рис.8. Деформация волн при совместном учете потерь на корону и из-за влияния земли при поражении молнией крайнего (первого) провода линии

Видно резкое различие с рис.7. При высоких удельных сопротивлениях грунта импульсная корона является добавочным фактором к искажению волн вследствие поверхностного эффекта в земле, а не наоборот. Во всяком случае, пренебрегать влиянием земли нельзя, хотя в большинстве работ, посвященных описанию и обработке экспериментальных исследований (например в [12]), этот фактор вообще не упоминается. Особенно сильно влияние проникновения поля в землю сказывается на начале коронирования. В [3] показано, что заземление параллельных проводов в месте удара молнии снижает напряжение начала короны на пораженном молнией проводе. Это происходит из-за появления отрицательных зарядов на параллельных проводах, которые необходимы для поддержания на них нулевого потенциала во внешнем поле, созданном зарядом пораженного провода. При учете влияния земли снижение напряжения, при котором начинается корона, проявляется значительно сильнее. Как видно из рис.6 и 8, в начальных частях импульсов на параллельных проводах появляются волны противоположного знака (в данном случае положительного). Это связано с разделением зарядов в изолированных проводах из-за разных скоростей распространения импульсов в волновых каналах. Положительные свободные заряды распространяются по линии почти со скоростью света в вакууме, создавая свое поле в месте расположения пораженного провода. Поэтому на этом проводе для создания того же уровня напряжения, что и в однопроводном случае, в многопроводной линии с потерями необходим больший заряд. Критический заряд в многопроводной линии будет возникать при меньших напряжениях, чем в однопроводной линии.

Таким образом, при учете обоих искажающих факторов на формирование фронтов импульсов напряжения на пораженном молнией проводе влияют несколько моментов: нарастание фронта исходной волны; деформация фронта из-за разных скоростей распространения в волновых каналах; нарастание импульсов напряжения противоположного знака на параллельных проводах, а затем переход этих импульсов через ноль. Последний момент влияет на плавность скорости нарастания напряжения вблизи коронного порога и скорость подъема напряжения после начала короны (рис.8б). Во всяком случае расчеты с использованием вольткулоновых характеристик одиночных проводов для объяснения данных классических экспериментов на многопроводных опытных участках линий и давали расхождения именно в форме кривых в самом начале коронирования и недостаточной вогнутости основной части фронта. В рамках данной работы такое сопоставление не проводилось. Считаем, что целесообразно вернуться к опытам 1960-х гг. для анализа их результатов на современном уровне развития математических моделей.

Теперь перейдем к учету влияния опор и возможному перекрытию линейной изоляции. Метод бегущих волн в рамках единой схемы замещения подхода ВЛ к подстанции позволяет учесть практически любые неоднородности линии по длине, в том числе влияние опор с соответствующим изменением взаимного расположения проводов. Разнообразие типов опор практически не позволяет создать универсальную схему их замещения с учетом реактивных параметров отдельных элементов опоры стоек, траверс, фундаментов, оттяжек и т.д. Так или иначе, приходится создавать некоторый банк данных для опор разных типов. Это выходит за рамки настоящей работы. Для методических целей была выбрана простейшая с алгоритмической точки зрения опора с треугольным расположением проводов и одним тросом (рис.9а).

В соответствии с рекомендациями, полученными в [13], в первом приближении учитываются только индуктивности вертикальных частей опоры. Индуктивностями траверс пренебрегаем. Активные сопротивления между проводами и телом опоры имитируют сопротивление изоляции проводов и троса и могут полагаться или очень большими (до пробоя) или малыми (после пробоя изоляции проводов и для заземленного троса). Будем считать, что вольт-секундная характеристика изоляции известна и задана массивом точек.

В принципе, никаких ограничений на сложность схемы замещения контура заземления опоры в описанном далее алгоритме не накладывается. Для простоты будем пренебрегать влиянием токов смещения в грунте и волновыми процессами в протяженных элементах заземлителей. Тогда схема замещения заземлителя опоры представляет собой  $RL$ -цепочку с последовательным соединением активного сопротивления и индуктивности. Даже в такой простейшей постановке задача может быть не тривиальной при учете искрообразования в грунте, когда и  $R$  и  $L$  становятся нелинейными, зависящими от доли тока, стекающего в грунт. Пока положим, что нелинейные процессы отсутствуют.

На опору с двух сторон по всем проводам подходят волны напряжения (слева – вектор  $U_{\text{Л}}$  и справа – вектор  $U_{\text{П}}$  на рис.9а). По матричному правилу эквивалентной волны можно заменить схемы с распределенными параметрами многополюсниками с чисто активными сопротивлениями, равными собственным и взаимным волновым сопротивлениям линии без потерь, и источниками напряжения, равными удвоенным значениям падающих волн. Следующим шагом в упрощении схемы (также по правилу эквивалентной волны) является суммирование векторов левых и правых волн и определение эквивалентного многополюсника так, как это показано на рис.9б. В описанной постановке индуктивность участка опоры между нижней траверсой и землей ( $L_{\text{оп}}$ ) и индуктивность контура заземления ( $L_{\text{к}}$ ) можно объединить в  $L_1$ . Тогда получаем достаточно простую схему рис.9б, которую можно включать в общий алгоритм расчета распространения грозových волн в многопроводной линии волновым методом. Сохраним название соответствующего узла такое же, как и в [9], т.е.  $R$ -узел. Эти узлы расставляются в схеме замещения линии в местах расположения реальных опор, что при характерном шаге расчета по длине 1 м можно сделать с высокой точностью.

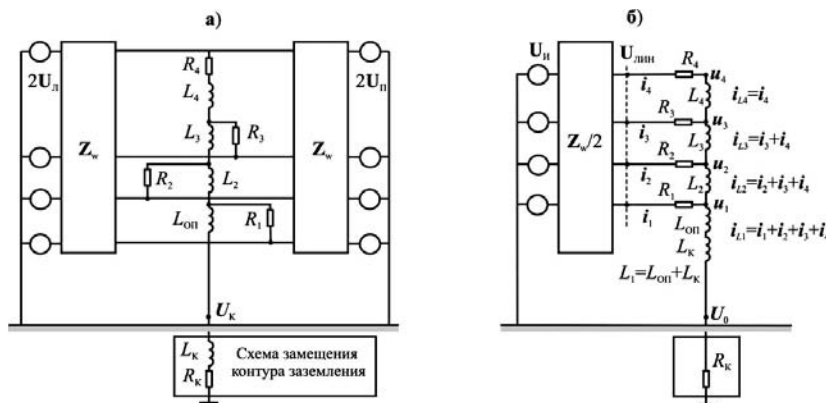


Рис.9. Схемы замещения участка линии с опорой

Система уравнений для схемы рис.9б выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
 u_1 &= L_1 \frac{d}{dt}(i_1 + i_2 + i_3 + i_4) + R_{\text{к}}(i_1 + i_2 + i_3 + i_4); \\
 u_2 - u_1 &= L_2 \frac{d}{dt}(i_2 + i_3 + i_4); \\
 u_3 - u_2 &= L_3 \frac{d}{dt}(i_3 + i_4); \\
 u_4 - u_3 &= L_4 \frac{d}{dt}i_4.
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Для записи системы (16) в матричном виде введем следующие обозначения:

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Тогда (16) приобретает вид:

$$\mathbf{D}_1 \mathbf{U} = \mathbf{L} \mathbf{D}_2 \frac{d}{dt} \mathbf{I} + \mathbf{D}_3 \mathbf{R}_{\dot{\mathbf{E}}}, \quad (18)$$

где  $\mathbf{U}$  – вектор напряжений на опоре (в принятых допущениях и упрощениях напряжений на уровне траверс и месте расположения троса);  $\mathbf{I}$  – вектор токов в схеме провода линии для свернутой схемы рис.9б.

Далее, вводя вектор напряжений источника как вектор удвоенных сумм левых и правых волн в каждом проводе линии, т.е. –  $U_{\dot{\mathbf{E}}} = 2(U_{\dot{\mathbf{E}}} + U_{\dot{\mathbf{I}}})$ , можно записать:

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_{\dot{\mathbf{E}}} - \left(\frac{1}{2} \mathbf{Z}_w + \mathbf{R}\right) \mathbf{I}, \quad (19)$$

где  $\mathbf{Z}_w$  – квадратная матрица волновых сопротивлений линии без потерь;  $\mathbf{R}$  – диагональная матрица активных сопротивлений, имитирующих сопротивление гирлянд изоляторов и режим заземления троса.

Теперь, подставляя (19) в (18) и разрешая относительно производных, получим:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{I} = \mathbf{D}_2^{-1} \mathbf{L}^{-1} \mathbf{D}_1 \left[ \mathbf{U}_{\dot{\mathbf{E}}} - \left(\frac{1}{2} \mathbf{Z}_w + \mathbf{R}\right) \mathbf{I} \right] - \mathbf{D}_2^{-1} \mathbf{L}^{-1} \mathbf{D}_3 \mathbf{R}_{\dot{\mathbf{E}}} \mathbf{I}. \quad (20)$$

После нахождения токов вектор искомых напряжений на проводах с учетом влияния опоры находится как:

$$\mathbf{U}_{\dot{\mathbf{E}}\dot{\mathbf{I}}} = \mathbf{U}_{\dot{\mathbf{E}}} - \frac{1}{2} \mathbf{Z}_w \mathbf{I}. \quad (21)$$

Выражения (20) и (21) в принятой постановке задачи решают вопрос о расчете напряжений на проводах линии в  $R$ -узле схемы замещения линии. Число проводов, принятое в рассматриваемом примере одноцепной линии с тросом равным 4, может быть любым. Например, для двухцепной линии с тросом достаточно положить размерность матриц и векторов, равной 7. Для задач, связанных с расчетом перекрытия только на одном фазном проводе, полученные выражения пригодны и для порталных опор и для опор с оттяжками. Ограничения на использование (20) и (21) возникают для линий с двумя тросами, особенно при расчете процессов после удара молнии в один из них. Однако для любой возможной конструкции опоры и варианта грозового поражения линии все изменения касаются только структуры матриц типа (17), что не является принципиальным затруднением. Поскольку число опор на подходе линии к подстанции не очень велико, для нахождения токов можно использовать непосредственно стандартные процедуры интегрирования систем дифференциальных уравнений численными методами. При этом необходимо учитывать два обстоятельства. Во-первых, индуктивности, включенные между проводами в схеме рис.9б, нельзя полагать равными нулю или слишком малыми. Практика расчетов показала, что даже при подвеске проводов на одном уровне эти индуктивности должны быть не менее чем  $10^{-3}$  от индуктивности участка между нижним проводом и землей. Во-вторых, сопротивления гирлянд изоляторов до их пробоя нужно полагать не выше чем  $10^3$  от значений волновых сопротивлений проводов. Оба ограничения

практически не влияют на точность счета. Расчеты различных вариантов процессов с учетом опор показали хорошую устойчивость счета при использовании процедур `Bulstoer()` в системе `Mathcad` и `IVPRK()` из библиотеки `IMSL`.

В данной работе анализируется влияние различных факторов на развитие волновых процессов в многопроводной линии. В качестве примера такого анализа рассмотрим вариант удара молнии в крайний провод линии с горизонтальным расположением проводов без тросов. Параметры линии описаны выше. Пусть амплитуда отрицательной волны, как и раньше, равна 600 кВ. Предположим, что опоры на подходе расставлены через 150 м. На первой из них происходит перекрытие гирлянды изоляторов при напряжении -550 кВ, т.е. вблизи максимума напряжения. Положим, что общая индуктивность нижнего участка опоры и контура заземления равна 20 мкГн. Для усиления эффекта влияния опоры положим активное сопротивление контура заземления очень малым, со значением 1 Ом. Различные варианты расчетов представлены на рис.10.

На всех графиках диапазон времен составил 0÷1 мкс. Это соответствует времени двойного пробега волн по пролету: отражение от первой по ходу движения волны опоры не успевают сказаться на процессах при  $x=0$ . На рис.10а показаны волны в линии без потерь. Для линии без потерь фронтовой участок волны при  $x=151$  м просто повторяет волну при  $x=0$ . При напряжении -550 кВ происходит перекрытие гирлянды и начинается спад волны до нуля с постоянной времени, определяемой матрицей волновых сопротивлений линии и индуктивностью 20 мкГн. Далее по линии этот импульс распространяется без изменений на любое расстояние. Другие опоры с теми же характеристиками изоляции не оказывают никакого влияния на волновой процесс. Естественно, этот расчетный случай тривиален и приведен здесь только для сопоставления с линией с учетом потерь.

На рисунке 10б, в, г, д, е, ж приведены результаты счета распространения срезанной волны при учете потерь в земле. Процессы становятся значительно сложнее. Наведенные напряжения при  $x=0$  (рис.10б) на параллельных проводах заметно увеличиваются из-за возрастающих коэффициентов связи между проводами [5]. Импульс при  $x=151$  м (рис.10в) удлиняется из-за незначительной, но заметной деформации волны при пробеге полутора сотен метров. На параллельных проводах появляются положительные выбросы (положительное направление оси напряжений на всех графиках рис.10 направлено вниз).

Уже при  $x\approx 300$  м (рис.10г) на параллельных проводах начинают появляться отрицательные выбросы. Это можно объяснить тем, что срез исходной волны можно рассматривать как новую волну противоположного (т.е. положительного) знака, начинающую распространяться от опоры. Эта волна вызывает на остальных проводах процессы, аналогичные исходной волне, т.е. выбросы обратного знака в начальных частях кривых.

При следующем удвоении расстояния ( $x\approx 600$  м, рис.10д) положительные выбросы от исходной волны превращаются в достаточно длинные волны, а отрицательные выбросы постепенно приближаются к спадающему напряжению на пораженном проводе. Теперь на всех трех проводах при времени более 0.5 мкс напряжение имеет один знак и близкие мгновенные значения. А это означает, что по всем фазам основная часть волны распространяется в канале «все провода – земля». Но этот канал имеет большое затухание и относительно низкую скорость распространения волн.

Это видно из рис.10е ( $x\approx 1200$  м), где выбросы на предыдущем рисунке превращаются при временах 0.6÷1.0 мкс в плавный подъем и спад напряжения на всех проводах, а при пробеге более 2 км (рис.10 ж) на всех трех проводах в пределах первой микросекунды остается только импульс, по длительности равный импульсу, возникающему непосредственно после первой опоры (рис.10в). Если сравнить импульсы в начале линии (рис.10б) и на относительно большом расстоянии от него (рис.10ж), то можно констатировать следующее. Для рассматриваемой трехпроводной линии в пределах первых 0.3 мкс на пораженном молнией проводе напряжение уменьшилось

в два раза, а на параллельных проводах поменяло знак. При этом наибольшие значения (по абсолютной величине) имеют напряжения на дальнем проводе, а не на ближнем, как это происходит при  $x=0$ . Крутые фронты и этих импульсов сохранились. Графики на рис.10з представляют собой уравновешенную систему напряжений токов и зарядов в межпроводных каналах. Если амплитуда этих импульсов не достигает напряжения начала короны, то они могут распространяться по линии с малыми потерями на десятки километров. Для целей анализа надежности грозозащиты подстанций все эти тонкие эффекты деформации волн имеют характер малых поправок. Однако это может быть важно для расшифровки процессов при регистрации грозовых поражений линий путем записи форм напряжений по ее концам.

При коронировании проводов кривые напряжений (рис.10з, и, к, л, м) остаются подобными описанным выше для случая отсутствия короны. Теперь амплитуда импульса при больших пробегах волны по пораженному проводу определяется критическим зарядом. Все импульсы дополнительно сглаживаются. В остальном кривые имеют вид рис.10б, в, г, д, е, ж.

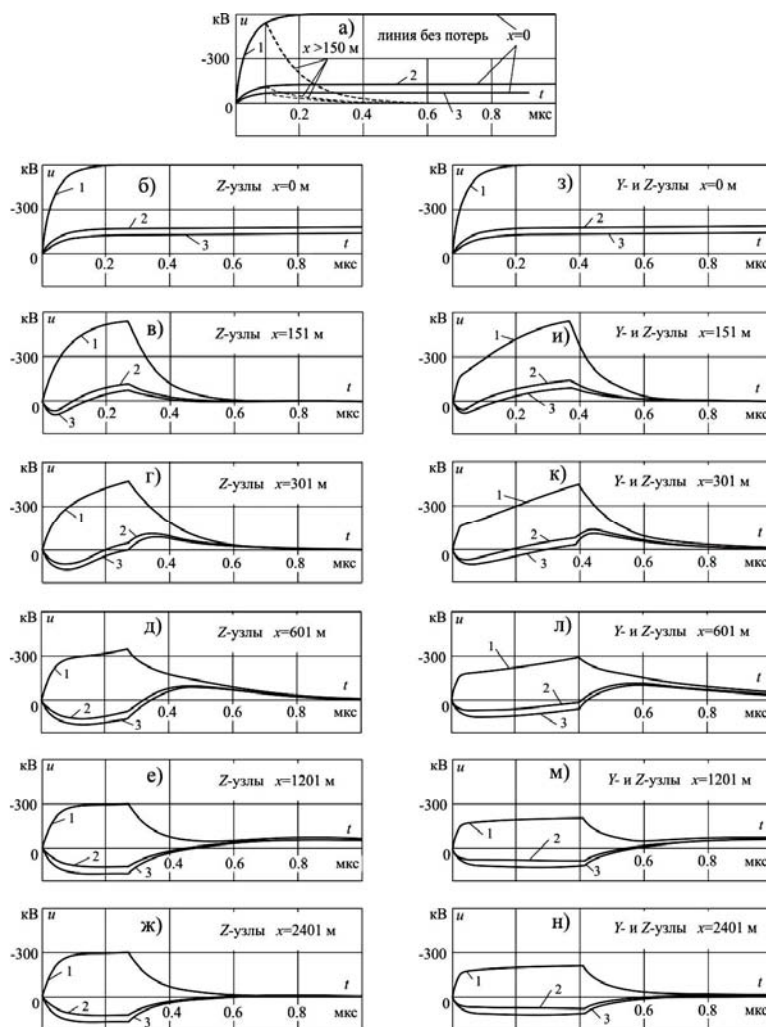


Рис.10. Деформация волн с учетом перекрытия линейной изоляции

При временах, больших времени двойного пробега волны по пролету линии, на форму кривых напряжений будут влиять отражения от места поражения линии. Это связано с моделированием системы «канал молнии – многопроводная линия», что выходило за рамки настоящей работы.

## **Выводы**

1. На основе метода бегущих волн впервые разработан алгоритм расчета деформации импульсов со спектром от десятков герц до десятков мегагерц в многопроводных воздушных линиях электропередачи с учетом потерь, вызванных влиянием скин-эффекта в земле.

2. Получено хорошее совпадение форм импульсов с фронтами в десятки наносекунд при расчетах по методу, основанному на применении интегрального преобразования Фурье, и методу бегущих волн с моделированием изменения параметров линии с произвольным числом  $RL$ -звеньев.

3. Выполнен анализ совместного влияния потерь в земле и импульсной короны на проводах. Впервые показано, что при высоких удельных сопротивлениях грунта влияние земли существенно изменяет как начало возникновения короны, так и дальнейший процесс сглаживания фронта импульса.

4. В рамках общего алгоритма расчета распространения волн с крутыми фронтами разработана модель узлов, имитирующих влияние опор с учетом индуктивностей их вертикальных элементов и индуктивностей заземлителей. Впервые выполнен анализ совместного влияния потерь в земле и короны на формирование импульсов до и после перекрытия гирлянд изоляторов на опоре и показан сложный характер изменения форм импульсов из-за различия постоянных времени распространения в волновых каналах многопроводной линии.

## **Литература**

1. Ефимов Б.В. Грозовые волны в воздушных линиях / Б.В.Ефимов. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2000. – 134 с.
2. Гуменова Н.И. Погонные параметры коронирующей многопроводной линии электропередачи, расположенной над идеально проводящей землей / Н.И.Гуменова, Б.В.Ефимов // Моделирование переходных процессов и установившихся режимов высоковольтной сети. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2008. – С. 7-16.
3. Гуменова Н.И. Анализ влияния короны в двухпроводной линии, подвешенной над идеально проводящей землей / Н.И.Гуменова, Б.В.Ефимов // Моделирование переходных процессов и установившихся режимов высоковольтной сети. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2008. – С. 16-38.
4. Гуменова Н.И. Распространение грозových волн в многопроводной коронирующей линии, подвешенной над идеально проводящей землей / Н.И.Гуменова, Б.В.Ефимов // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Вып.2. – Апатиты, 2011. – С. 66-78.
5. Ефимов Б.В. Методические вопросы расчета распространения грозových волн в коронирующей линии электропередачи методом бегущих волн / Б.В.Ефимов, Н.И.Гуменова // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Вып.3. – Апатиты, 2011. – С. 83-98.
6. Гуменова Н.И. Влияние многослойности грунта на параметры многопроводной линии и деформацию фронтов грозových волн / Н.И.Гуменова, Б.В.Ефимов. – СПб.: НТВ СПбГПУ, 2009. – 4-1 (89). – С. 188-201.
7. Ефимов Б.В. Анализ деформации грозových волн при их распространении по ВЛ на расстояние более 100 км / Б.В.Ефимов, Н.И.Гуменова, Я.А.Стогова // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Вып.2. – Апатиты, 2011. – С. 43-59.



8. Ефимов Б.В. Моделирование деформации фронтов грозových волн в воздушных линиях вследствие потерь в земле с помощью дискретных неоднородностей / Б.В.Ефимов, Н.И.Гумерова // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Вып.3. – Апатиты, 2011. – С. 99-116.
9. Костенко М.В. Анализ надежности грозозащиты подстанций // М.В.Костенко, Б.В.Ефимов, И.М.Зархи, Н.И.Гумерова. – Л.: Наука, 1981. – 127 с.
10. Костенко М.В. Волновые процессы и электрические помехи в линиях высокого напряжения / М.В.Костенко, Л.С.Перельман, Ю.П.Шкарин. – М.: Энергия, 1973. – 270 с.
11. Гумерова Н.И. Переходные процессы в энергетическом оборудовании высокого напряжения и их анализ / Н.И.Гумерова, Б.В.Ефимов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 156 с.
12. Wagner C.F. Effect of corona in traveling waves / C.F.Wagner, B.L.Lloyd // Trans AIEE. – 1955. – Vol.74. – P. 3.
13. Халилов Ф.Х. Выбор модели опоры ВЛ 35-220 кВ при анализе грозových перенапряжений / Ф.Х.Халилов, Г.Г.Хохлов // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Вып.2. – Апатиты, 2011. – С. 112-117.

#### **Сведения об авторах**

##### **Ефимов Борис Васильевич**

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

##### **Гумерова Натэлла Идрисовна**

доцент кафедры «Электроэнергетика, техника высоких напряжений»  
Санкт-Петербургского государственного политехнического университета,  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Россия, г.Санкт-Петербург, ул.Политехническая, д.29  
тел. 8-911-257-38-09, эл. почта: nigumerova@mail.ru

УДК 621.311

**А.Н.Данилин, В.В.Ивонин**

#### **ОЦЕНКА КОРРЕКТНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ПРОЦЕССОВ ИСКРООБРАЗОВАНИЯ ВОКРУГ ЭЛЕКТРОДОВ, РАЗМЕЩЕННЫХ В УВЛАЖНЕННОМ ГРУНТЕ\***

##### **Аннотация**

Приведены результаты оценки корректности оптических наблюдений искрообразования вокруг электродов, размещенных на границе «увлаженный грунт – стекло». Сравнительный расчет плотности токов для электродов, размещенных в однородной и неоднородной средах, показал, что только для электродов, имеющих малую толщину, плотности тока имеют близкие значения.

##### **Ключевые слова:**

*искрообразования в грунте, оптические наблюдения, моделирование электромагнитных полей.*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-00690).

A.N.Danilin, V.V.Ivonin

## PROPRIETY ESTIMATE OF SPARKING OPTICAL OBSERVATIONS AROUND ELECTRODE BURIED IN THE MOIST SOIL

### Abstract

The results of propriety estimate of optical sparking observations around electrode buried in the moist soil are presented. Current density comparative calculations for homogeneous and heterogeneous soils show that the current densities are more similar for finer electrodes.

### Keywords:

*sparking in the soil, optical observations, electromagnetic field simulation.*

Известно, что при критических значениях напряженности поля на поверхности электродов, размещенных в увлажненном грунте, начинается искрообразование, снижающее сопротивление электрода. Оптические наблюдения этих процессов приведены в наших статьях, опубликованных ранее [1, 2, 3], а также описаны в ряде других источников [4, 5]. Предполагалось, что изучаемые электроды имели профили металлических конструкций, используемых в реальных заземляющих устройствах: стальной круглый прокат, стальная полоса, уголкового типа. Устройство, в котором проводились эти исследования, приведено на рис.1. Электрод, размещаемый во влажном однородном песке и имеющий профиль заземляющей конструкции, прилегал к стенке стеклянного цилиндра, и сквозь стекло фотографировались процессы искрообразования вокруг электрода.

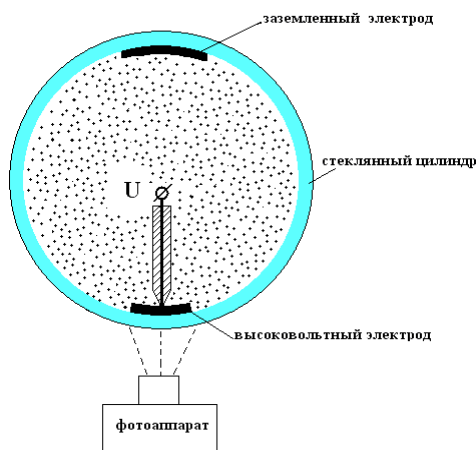


Рис.1. Конструкция устройства для оптических исследований процессов искрообразования в грунте на границе «электрод – грунт»

Вопрос о корректности таких наблюдений, а именно соответствия искровых процессов в грунте на границе «электрод – грунт» у моделей и реальных заземляющих устройств, оставался открытым.

При решении этой задачи предполагалось, что соответствие может быть достигнуто в том случае, если на границе «электрод – грунт» напряженность поля (или плотность стекающего тока) будет одинаковой как при размещении модели в сплошном грунте, так и в случае, когда модель прилегает к стеклу. При этом масштаб модели к реальному заземляющему устройству не играет роли.

Другим допущением было то, что при критических напряженностях процесс искрообразования в грунте примерно одинаков как на протяженном электроде, так и на тонком электроде, имеющем профиль протяженного заземлителя.

Для расчетов напряженностей на краях профилей моделей заземлителей использовалась программа FEMM (Finite Element Method Magnetic), которая позволяет создавать модели для расчета плоскопараллельных или осесимметричных электромагнитных полей и определять дифференциальные и интегральные параметры поля [6]. При решении данной задачи рассчитывалась плотность тока на границе «электрод – грунт».

Чтобы оценить, насколько стеклянный сосуд искажает картину процесса искрообразования, производилось сравнение плотностей тока на границах электродов просто в грунте и на границах «электрод – песок – стекло». В качестве электрода рассматривалось сечение круглого проката в виде круглого листа меди толщиной 0.3 мм. Диаметр круга 2 см.

На рисунке 2 представлены геометрические модели для расчетов.

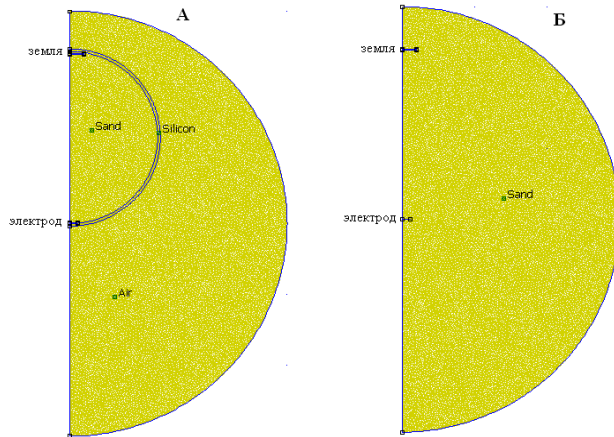


Рис.2. Геометрические модели:

*A – электрод и заземлитель размещены у стенок стеклянного цилиндра с песком;  
B – электрод и заземлитель размещены в однородной песочной среде*

Геометрическая модель А состоит из трех областей: песок ( $\epsilon = 50$ ,  $\sigma = 0.0005$  См/м), стекло ( $\epsilon = 12$ ,  $\sigma = 0$ ) и воздух ( $\epsilon = 1$ ,  $\sigma = 0$ ). Чтобы измерить удельное сопротивление песка использовался коаксиальный пробник [2]. Модель Б рассматривается как приближенная к реальным условиям, поэтому в ней учитывается только одна область – песок.

На рисунках 3, 4 представлены картины распределения плотностей тока, где черным отмечены эквипотенциальные линии.

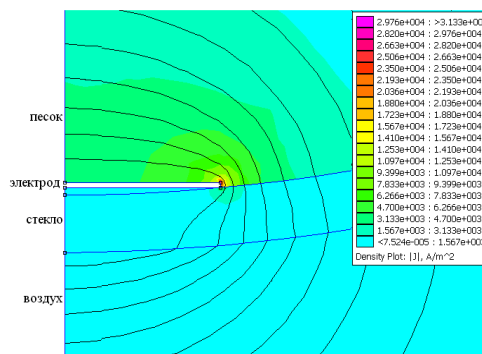


Рис.3. Распределение плотностей тока на границе «электрод – песок – стекло – воздух»

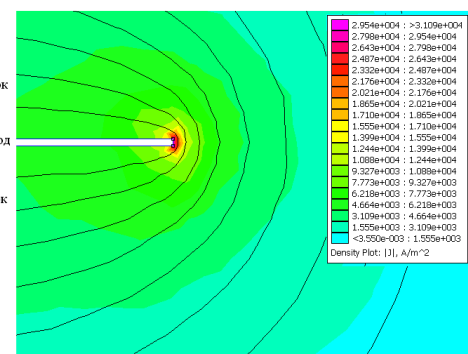


Рис.4. Распределение плотностей тока «электрод – однородный песок»

Для оценки плотностей тока была выбрана одна точка, расположенная на краю электрода. В случае модели с использованием стеклянного сосуда плотность тока составила  $|J|=22247 \text{ A/m}^2$ , а плотность тока в той же самой точке в модели без стекла –  $|J|=28303 \text{ A/m}^2$ . Получается, что в модели, описанной в первой части статьи [1], погрешность составляет около 21%.

На рисунке 5 представлены графики распределения плотностей тока вдоль электрода:  $J_1$  – плотность тока на границе «песок – стекло»;  $J_2$  – плотность тока в песке.

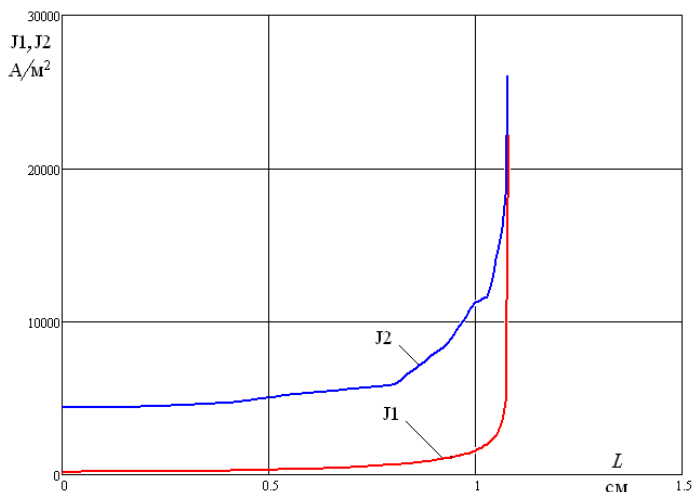


Рис.5. Кривые распределения плотностей тока вдоль электрода

Из графиков рис.5 видно, что плотности тока в обоих случаях увеличиваются с приближением к краю электрода. В случае со стеклом плотность тока практически равна нулю на протяжении всего электрода и увеличивается только на самом его краю. Это объясняется нулевой проводимостью стекла.

Данный график объясняет фотографии (рис.6), полученные в ходе оптических исследований процессов искрообразования в песке, на которых видно, что искрообразования происходят только на краях электрода. Безусловно, напряженности на поверхности сплошного круглого прутка при тех же напряжениях, что и на круглой тонкой пластине, будут на порядки ниже, однако можно ожидать, что процесс искрообразования при достижении критической напряженности будет носить такой же характер.

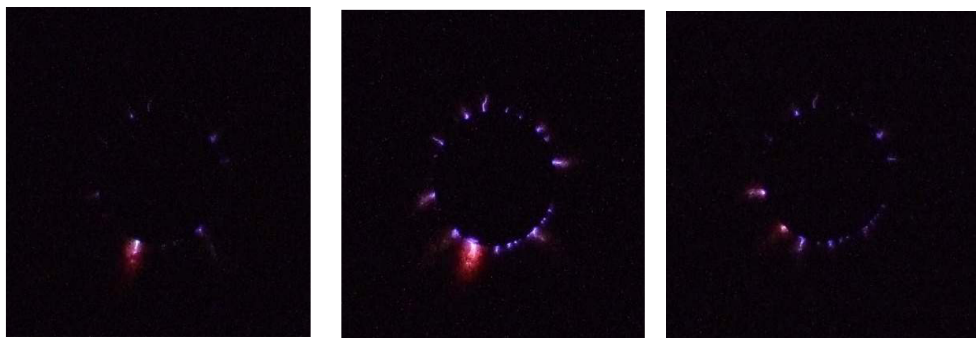


Рис.6. Фотографии искрообразования вокруг электрода, имеющего профиль круглого стержня в зависимости от напряжения

В данной работе также использовался электрод, представленный на рис.7. В качестве высоковольтного электрода использовался медный шар диаметром 30 мм. Сравнительные расчеты поля на границе «песок – шар – стекло – воздух» и просто «шар – песок» (однородное поле) приведены на рис.8, 9.

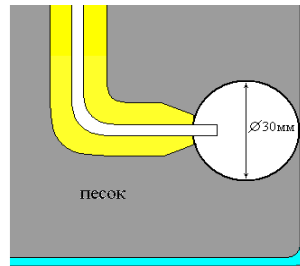


Рис.7. Шаровый электрод, помещенный в стеклянный резервуар, заполненный песком

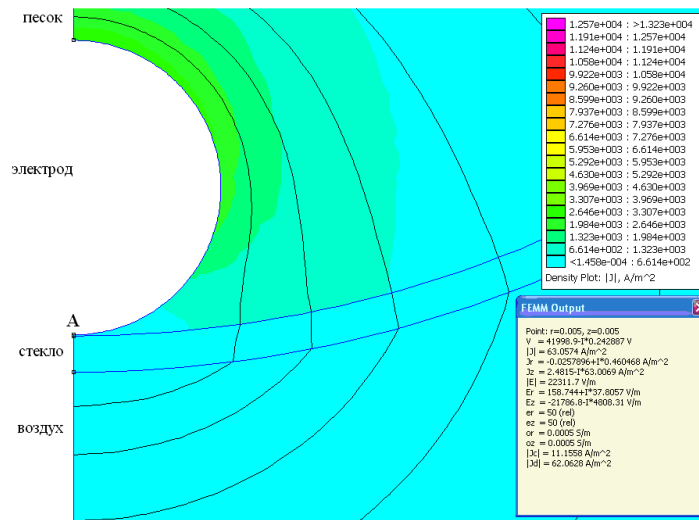


Рис.8. Распределение плотностей тока на границе «электрод – песок – стекло – воздух»

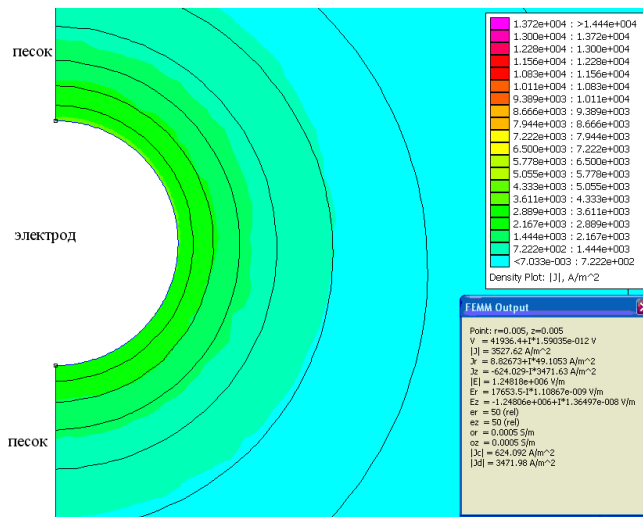


Рис.9. Распределение плотностей тока «электрод – однородный песок»

Для данного типа электрода также была выбрана одна точка, чтобы оценить плотности тока. В случае модели с использованием стеклянного сосуда плотность тока составила  $J_l=63 \text{ A/m}^2$ , а плотность тока в той же самой точке в модели без стекла –  $J_l=3527 \text{ A/m}^2$ . Разница составила 56 раз, поэтому на границе «стекло – шар» искрообразование не наблюдалось. Естественно, такая модель не адекватна модели электрода в однородной среде.

### **Выводы**

1. Предложенный метод оптических наблюдений процессов искрообразования на границе «электрод – грунт» достаточно корректен для моделей, имитирующих сечение электродов в грунте и выполненных из тонких листов металла.

2. Коэффициент подобия неопределим. Можно лишь заключить, что наблюдаемые процессы на поверхности протяженных заземлителей будут носить такой же характер, как и на модели сечения протяженного электрода.

3. Предложенный способ оптических наблюдений искрообразования в грунте применим для электродов, имеющих иные сечения, например уголкового сечения, стальные полосы и др.

### **Литература**

1. Данилин А.Н. Лабораторные исследования процессов искрообразования в увлажненном грунте в зависимости от амплитуды и длительности импульсного напряжения на заземленном устройстве / А.Н.Данилин, В.В.Ивонин, Д.В.Куклин. Статья в настоящем сборнике.
2. Данилин А.Н. 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 Кольского научного центра РАН. Энергетика. – 2011. – № 2(5). – С. 39-54.
3. Данилин А.Н. Экспериментальное моделирование импульсных процессов в элементах заземляющих устройств / А.Н.Данилин, В.Н.Селиванов // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. – 2012. – № 1(8). – С. 25-38.
4. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения / Е.Я.Рябкова. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.
5. Техника высоких напряжений / под ред. М.В.Костенко. – М.: Высш. шк., 1973. – 528 с.
6. Повышающий преобразователь и система энергопередачи генератора «Энергия-2» для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений / Е.Д.Терещенко, В.Ф.Григорьев, М.Б.Баранник, А.Н.Данилин, Б.В.Ефимов, В.В.Колобов, П.И.Прокопчук, В.Н.Селиванов, Ю.А.Копытенко, А.А.Жамалетдинов // Сейсмические приборы. – 2008. – Т.44, № 4. – С. 43-66.

### **Сведения об авторах**

#### **Данилин Аркадий Николаевич**

заведующий лабораторией высоковольтной электроэнергетики и технологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, кандидат технических наук  
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, Д.В.Куклин**

**ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИСКРООБРАЗОВАНИЯ  
В УВЛАЖНЕННОМ ГРУНТЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ АМПЛИТУДЫ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ  
ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЗАЗЕМЛЕННОМ УСТРОЙСТВЕ**

**Аннотация**

Приведены результаты экспериментальных исследований процессов искрообразования в грунте на границе «заземленный электрод – увлажненный грунт». Установлены зависимости изменения параметров заземлителя, а именно его импульсного сопротивления от длительности и амплитуды приложенного импульсного напряжения. Измерения выполнены при двух значениях влажности грунта – 10 и 20%. Кроме электрических измерений выполнены оптические исследования процесса искрообразования на границе «электрод – грунт». Приведенные результаты носят феноменологический характер и представляют собой исходный материал для их теоретической интерпретации.

**Ключевые слова:**

*процессы ионизации грунта, пробой грунта, импульсное сопротивление заземлителя.*

**A.N.Danilin, V.V.Ivonin, D.V.Kuklin**

**LABORATORY STUDIES OF SPARKING IN THE MOIST SOIL DEPENDING ON AMPLITUDE  
AND DURATION OF IMPULSE VOLTAGE ON THE GROUNDING**

**Abstract**

The results of experimental studies of sparking in the soil at boundary between grounded electrode and soil are presented. Dependence of transient resistance on duration and amplitude of impulse voltage is determined. Measurements are carried out for two values of soil moisture – 10 and 20%. Optical analyses of sparking in the soil at electrode – soil boundary were carried out. The obtained results have phenomenological character and later will be studied theoretically.

**Keywords:**

*soil ionization phenomena, soil breakdown, impulse grounding impedance.*

Опыт исследований процессов искрообразования в грунте при высоких импульсных напряжениях показал, что образующийся искровой чехол вокруг электрода приводит к увеличению поверхности растекания тока и, соответственно, к снижению импульсного сопротивления заземлителя. В предыдущих опытах [1, 2] были определены уровни напряженностей поля на поверхности электрода, при которых начинается процесс искрообразования. В тех же опытах было показано, что процесс искрообразования носит скачкообразный характер и начинается с некоторой задержкой. Далее процесс искрообразования идет по нарастающей и длится некоторое время до установившегося значения, о чем можно судить по процессу установления импульсного сопротивления электрода в грунте. Время начала образования искрового чехла вокруг электрода и время образования нового значения сопротивления зависят от ряда параметров: степени неоднородности поля вокруг электрода, амплитуды импульсного напряжения, удельной проводимости и влажности грунта и, наконец, от длительности импульса напряжения.

В данной работе приводятся результаты исследования процесса искрообразования и сопутствующего ему изменения электрических параметров заземлителя. Исследования включают в себя измерения импульсных параметров при прохождении импульса (тока, напряжения и сопротивления) и оптические наблюдения процесса искрообразования.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-00690).

Главной целью исследований являлось изучение влияния длительности импульса на процесс искрообразования в грунте вокруг электрода и на его импульсное сопротивление.

На данном этапе исследований было принято решение за длительность импульса напряжения, подаваемого на электрод, считать постоянную времени, формируемую  $R$ - $C$ -цепью, где  $C$  – емкость генератора импульсных напряжений (ГИН) в ударе,  $R$  – формирующее сопротивление, подключаемое параллельно ГИН. Постоянная времени –  $\tau = RC$ .

Безусловно, длительность этого процесса зависела также от сопротивления самой электродной системы в грунте. Эта величина достигала нескольких кОм и при малых длительностях импульса, особенно интересных в данных исследованиях, на длительность формируемого импульса влияния практически не оказывала.

На рисунке 1 приведена схема генераторной установки с ее основными параметрами, сопряженной со стеклянным резервуаром с увлажненным кварцевым песком, в котором был размещен электрод.

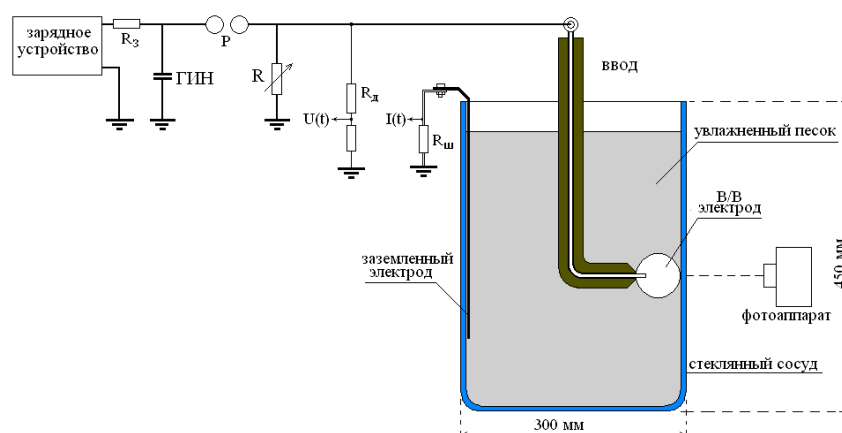


Рис.1. Схема генераторной установки, сопряженной со стеклянным резервуаром с увлажненным кварцевым песком, в котором размещен электрод:

$R_3$  – защитный резистор; ГИН – генератор импульсного напряжения;  $R$  – сопротивление формирования заданной постоянной времени;  $R_d$  – делитель напряжения;  $R_{ш}$  – токовый шунт

Оптические наблюдения искрообразования выполнялись путем фотографирования процесса, возникающего в грунте вокруг электрода, касающегося стеклянного сосуда изнутри, как показано на рис.1.

Параметры системы.

1. ГИН имеет емкость в ударе 0.05 мкФ.
2. Измерительные устройства:  $R_d=24$  кОм,  $R_{ш}=0.1$  Ом.
3. Сопротивление формирующего резистора изменялось в диапазоне от 50 Ом до 10 кОм; соответственно, постоянная времени  $\tau$  менялась в диапазоне от  $2.5 \cdot 10^{-6}$  до  $500 \cdot 10^{-6}$  с.
4. Напряжение на выходе ГИН регулировалось источником зарядного напряжения и искровым шаровым промежутком в диапазоне от 10 до 60 кВ.

Приведенные результаты (в зависимости от вида электродной системы) представлены в нескольких частях с соответствующими комментариями и выводами, сделанными по результатам наблюдений.



## Электродная система с однородным полем вблизи электрода

Электрод представляет собой латунный шар диаметром 30 мм. Измерения проводились по ряду дискретных значений импульсного напряжения на электроде: 30, 42, 48 и 54 кВ.

### Результаты измерений при влажности грунта 20%

На рисунке 2 приведен характерный импульс при  $U=54$  кВ и  $\tau=125$  мкс на разных развертках. Здесь сопротивление  $R$  является некой характеризующей величиной и определяется как отношение во времени напряжения к току.

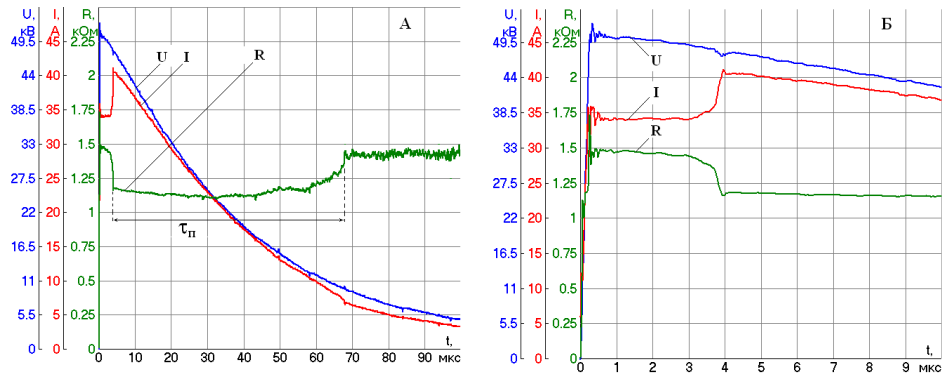
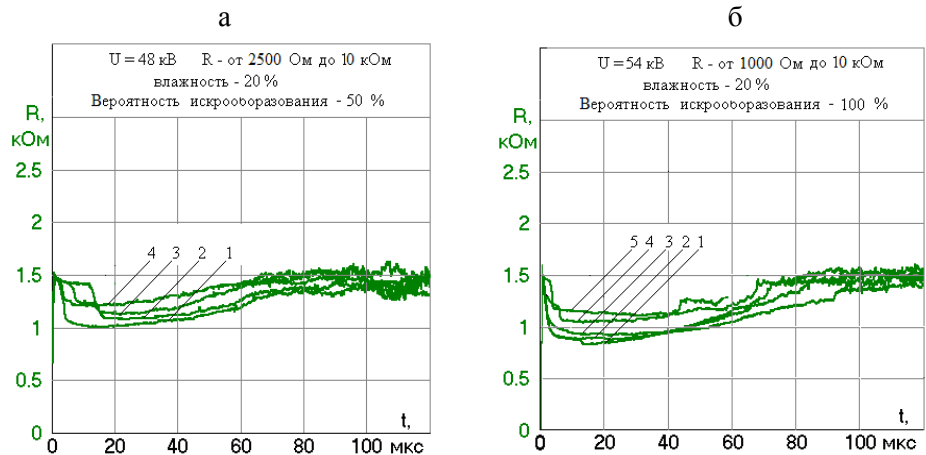


Рис.2. Импульсные электрические параметры электрода при  $U=54$  кВ и  $\tau=125$  мкс (на разных развертках)

На рисунке 3 представлены зависимости сопротивления электродной системы от амплитуды импульса напряжения и его длительности.



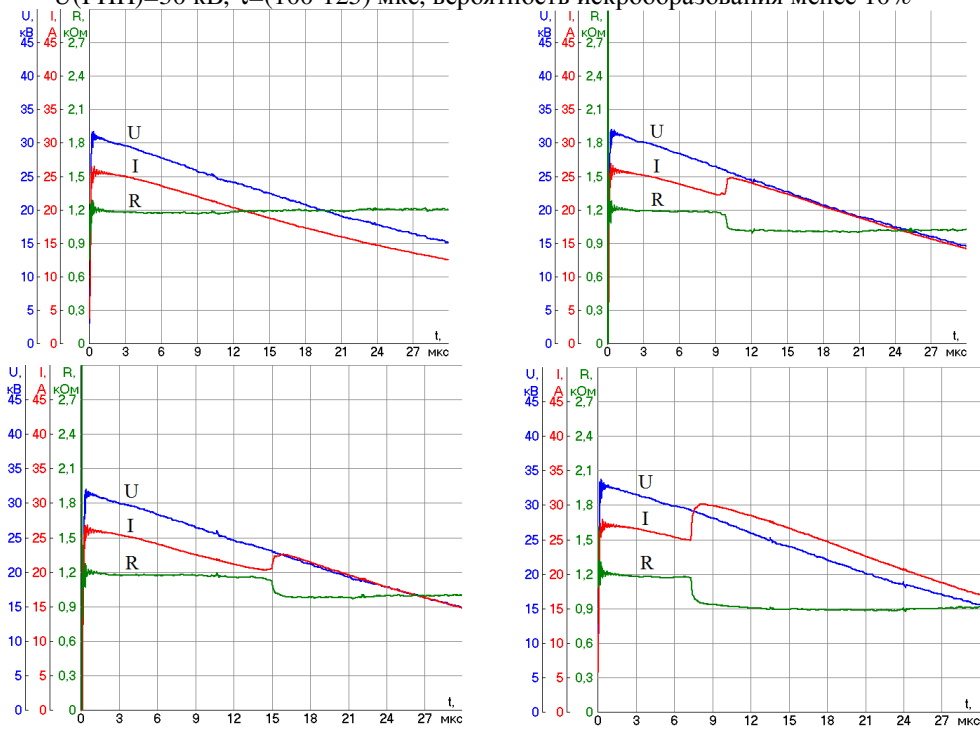
Постоянные времени (мкс):  
1 –  $\tau=600$ ; 2 –  $\tau=500$ ; 3 –  $\tau=260$ ; 4 –  $\tau=125$

Постоянные времени (мкс):  
1 –  $\tau=600$ ; 2 –  $\tau=500$ ; 3 –  $\tau=260$ ; 4 –  $\tau=125$ ; 5 –  $\tau=50$

Рис.3. Зависимости сопротивления электродной системы от амплитуды импульса напряжения и его длительности

На рисунке 4 приведена статистическая подборка характерных осциллограмм при напряжениях, близких к граничным, в отношении начала искрообразования в грунте (30-36 кВ) при влажности грунта 20%.

$U(\text{ГИН})=30 \text{ кВ}$ ,  $\tau=(100-125) \text{ мкс}$ , вероятность искробразования менее 10%



$U(\text{ГИН})=36 \text{ кВ}$ ,  $\tau=(25-125) \text{ мкс}$ , вероятность искробразования более 80%

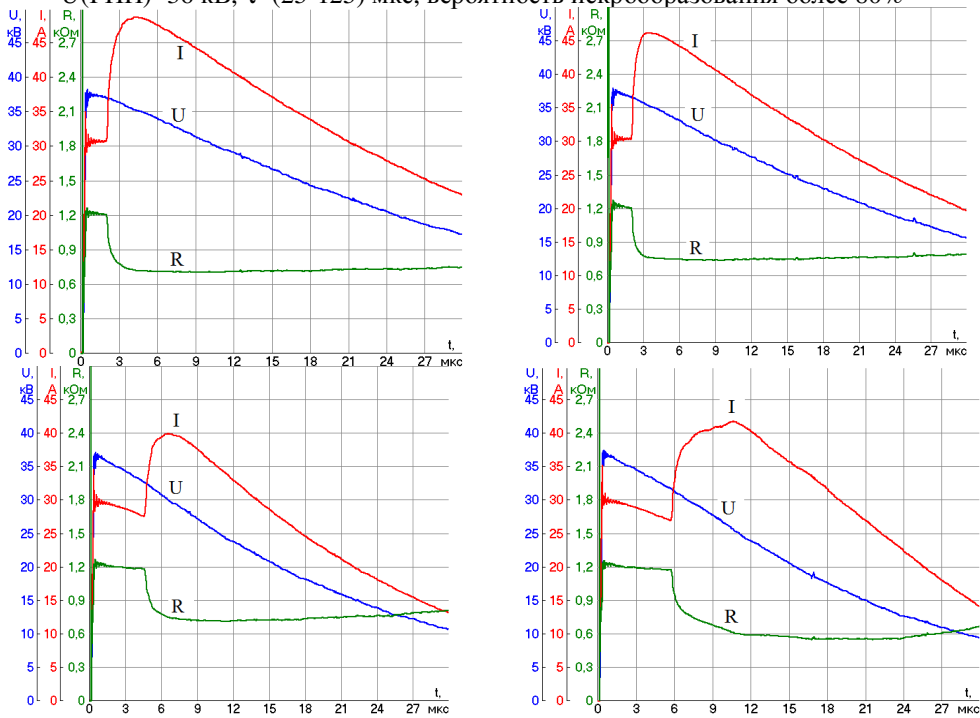


Рис.4. Статистическая подборка характерных осциллограмм при напряжениях, близких к граничным, в отношении начала искробразования в грунте (30-36 кВ) при влажности грунта 20%

Результаты измерений при влажности грунта 10% приведены на осциллограммах рис.5, 6.

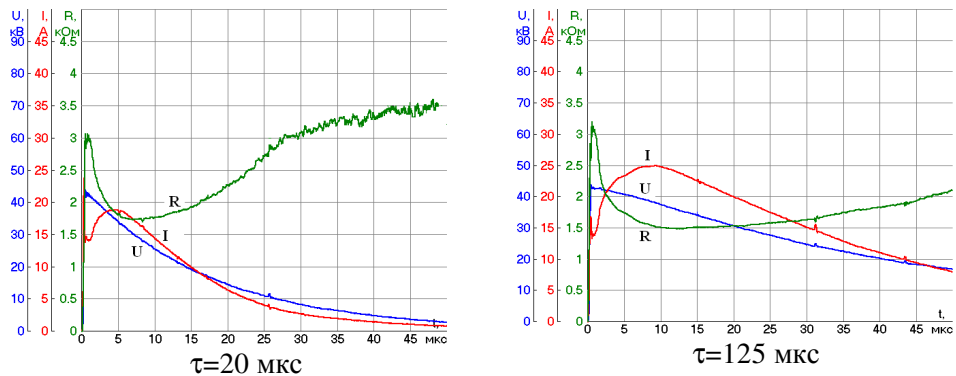
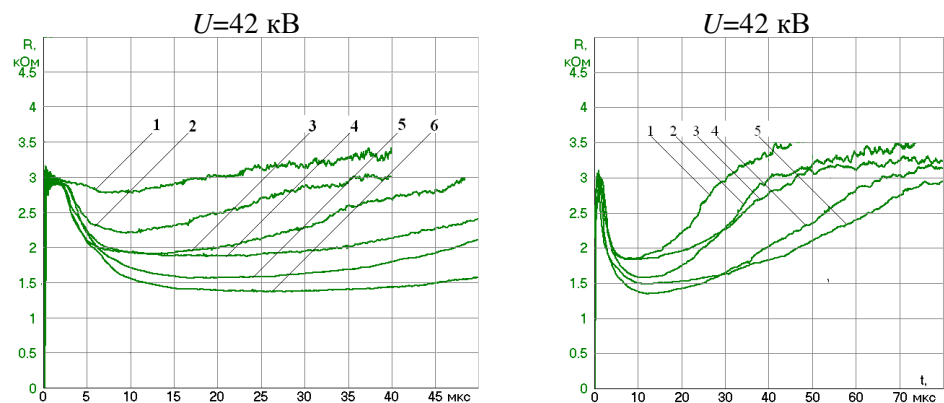


Рис.5. Импульсные электрические параметры электрода при  $U=42$  кВ и разных значениях постоянной времени



- 1 –  $\tau=16.7$  мкс ( $R=335$  Ом)
- 2 –  $\tau=30.5$  мкс ( $R=610$  Ом)
- 3 –  $\tau=49$  мкс ( $R=980$  Ом)
- 4 –  $\tau=125$  мкс ( $R=2500$  Ом)
- 5 –  $\tau=177$  мкс ( $R=3550$  Ом)
- 6 –  $\tau=510$  мкс ( $R=10200$  Ом)

- 1 –  $\tau=16.7$  мкс ( $R=335$  Ом)
- 2 –  $\tau=30.5$  мкс ( $R=610$  Ом)
- 3 –  $\tau=49$  мкс ( $R=980$  Ом)
- 4 –  $\tau=75$  мкс ( $R=1510$  Ом)
- 5 –  $\tau=125$  мкс ( $R=2500$  Ом)

Рис.6. Зависимости сопротивления электродной системы от амплитуды импульса напряжения и его длительности

### Выводы по результатам исследований с электродной системой в виде сферы

При 20%-й влажности грунта можно заключить следующее.

1. При напряжениях ниже 48 кВ сопротивление электродной системы остается неизменным, равным примерно 1.5 кОм. С увеличением напряжения при достижении напряженности на поверхности шара выше критической начинается образование вокруг шара хорошо проводящего чехла.

2. Начало искрообразования происходит с задержкой (2.5-5 мкс) после чего практически мгновенно (менее микросекунды, см. осциллограммы

на разных развертках рис.2, 3А, Б) искровой чехол вокруг шара «раздувается» до размера, при котором напряженность поля на его поверхности будет меньше критической напряженности начала искрообразования. Внутри чехла падение напряжения крайне мало. Соответственно при такой конфигурации системы ее полное сопротивление будет ниже. По мере стекания тока и снижения напряжения разряжающегося конденсатора начинается сравнительно медленный рост сопротивления и при определенном значении напряжения чехол «гаснет», при этом за 2-3 мкс сопротивление восстанавливается до значения, которое было до начала образования искрового чехла. На осциллограмме сопротивления быстрые сброс сопротивления и его восстановление создают «полку» сниженного сопротивления (рис.3А). Длительность полки ( $\tau_{п.}$ ) пропорциональна длительности импульса генератора. Глубина сброса сопротивления также зависит от длительности приложенного импульса.

Такой процесс наблюдается при высокой влажности грунта (20%). При вдвое меньшей влажности 10% (см. ниже) исходное сопротивление вдвое выше и процесс носит другой характер.

3. Оптические наблюдения за процессом пробоя грунта вокруг шара в месте касания шаром стекла и образования проводящего чехла результатов не дали. Проводящий чехол в оптическом диапазоне оставался невидимым и *не наблюдался при всех использованных в опытах напряжениях при любых влажностях грунта.*

При 10%-й влажности.

4. При меньшей влажности снижение сопротивления после площадки и его восстановление по мере снижения напряжения импульса происходит более плавно (рис.5, 7, 8).

5. Статистический разброс значения сопротивления при многократном импульсном воздействии при различной длительности импульса приведен на рис.8 и очень велик, поэтому не удалась попытка построить вольт-секундную характеристику начала искрообразования. Это также вызвано тем, что параметры грунта при многократном воздействии значительно изменяются и их значения в начале серии опытов трудно сравнимы с параметрами в конце опытов. Для построения такой характеристики грунту между опытами необходима релаксация, смысл которой по-настоящему не определен.

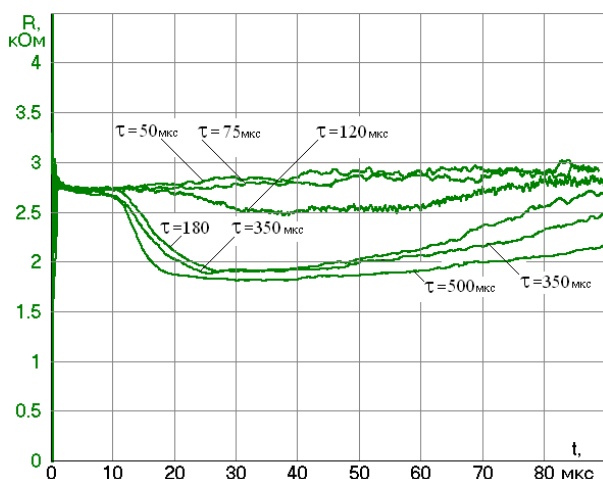


Рис.7. Зависимости сопротивления электродной системы от длительности импульса при напряжении 30 кВ

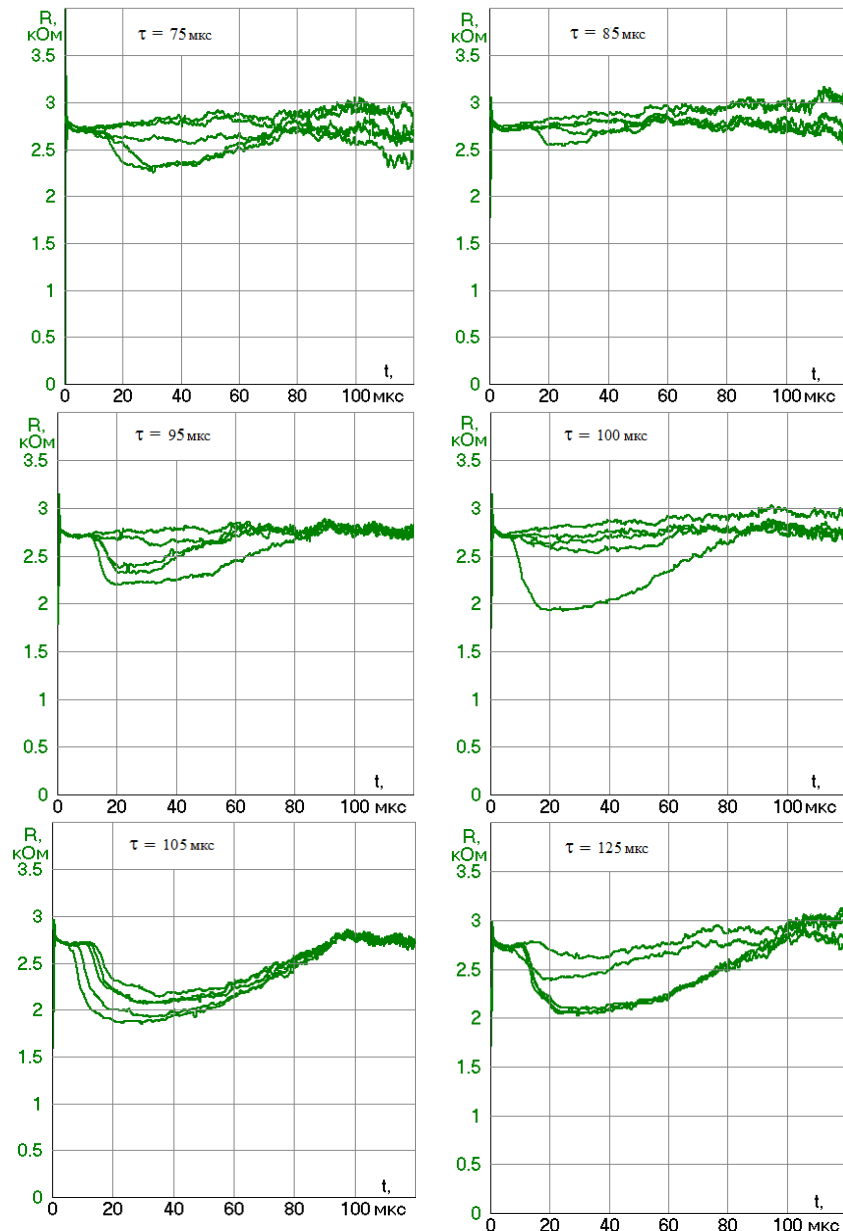


Рис.8. Статистический разброс значения сопротивления электрода при одинаковых значениях постоянной времени (пять наложенных импульсов)

#### Электродная система с резко неоднородным полем вблизи электрода

В данной серии опытов использовался электрод в виде тонкого диска, касающегося стекла в емкости с влажным грунтом. Производилась одновременная фиксация импульсных электрических параметров с фотосъемкой искрообразования в грунте по контуру диска.

Целью исследования было нахождение корреляции между параметрами искрообразования, регистрируемыми осциллографическим и оптическим методами. Параметры диска: диаметр  $D=21.5$  мм, толщина – 1 мм. Ниже приведены результаты трех серий опытов при влажности грунта 10%.

**Серия опытов, проведенных при напряжении ГИН 30 кВ и различной длительности импульса (рис.9, 10)**

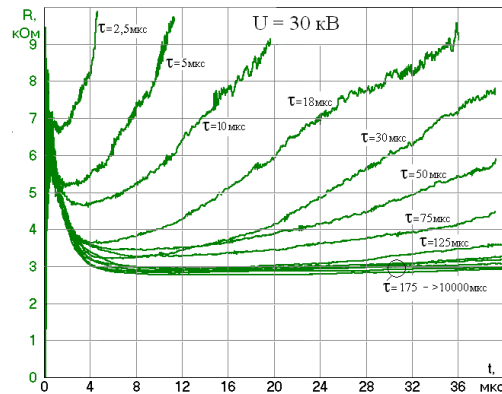
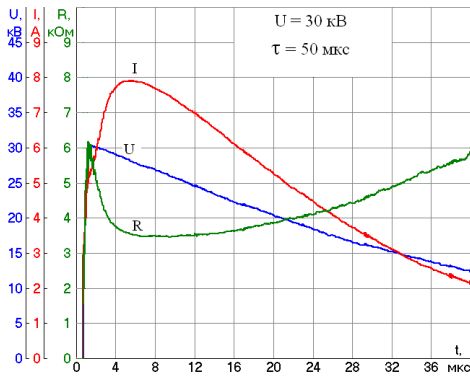
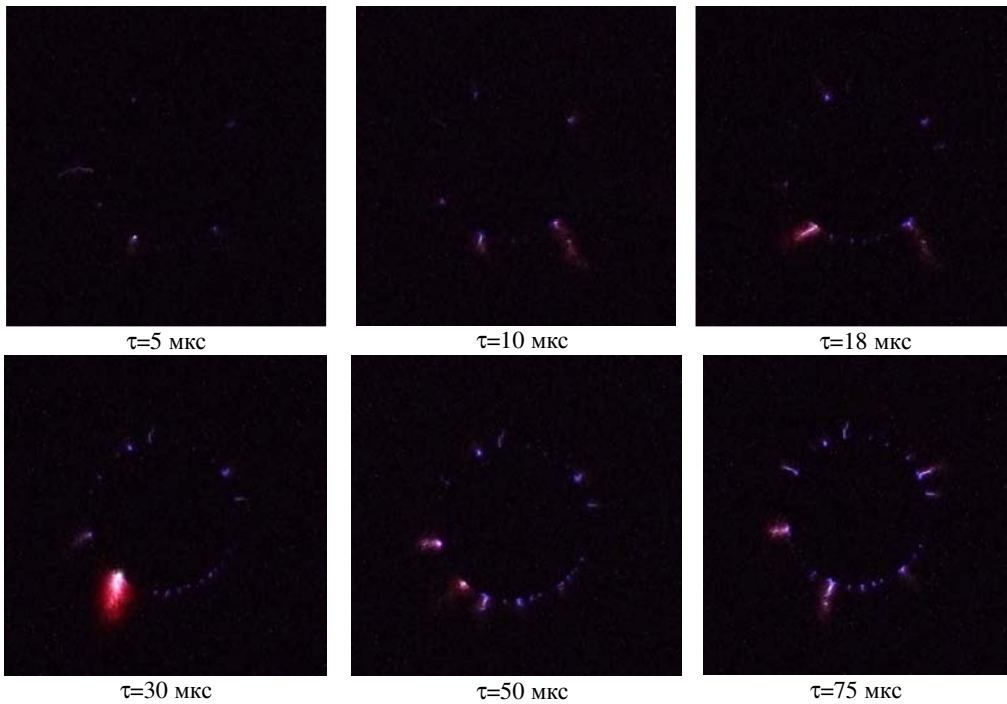


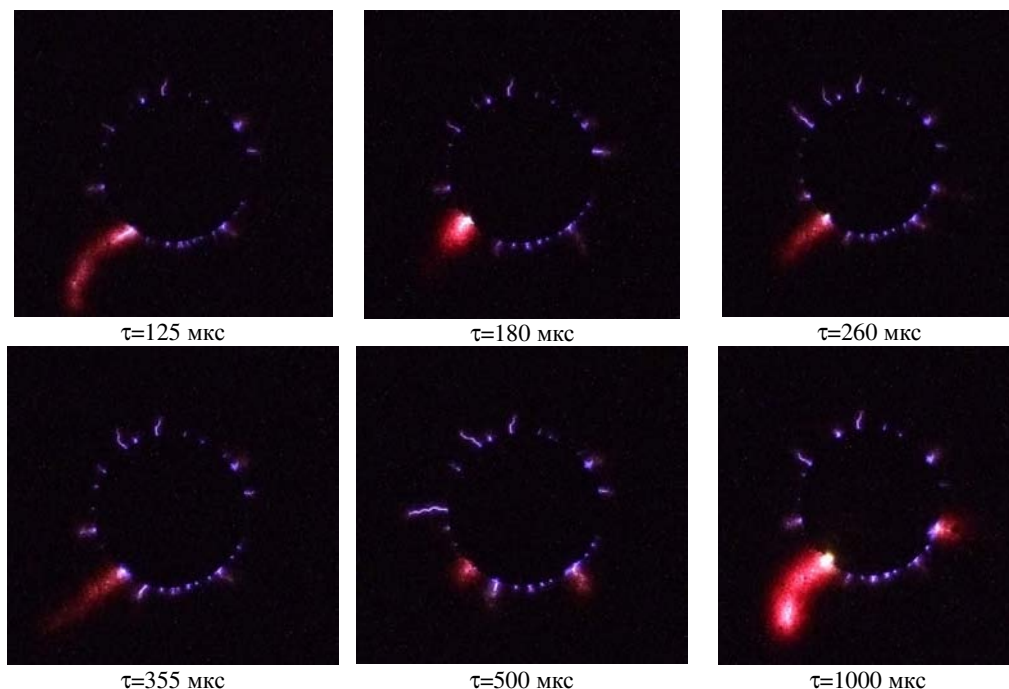
Рис.9. Пример осциллограммы  $U, I, R$  при  $\tau=RC=50$  мкс

Рис.10. Зависимости сопротивления электродной системы, определяемой как отношение напряжения к току, от длительности импульса на нагрузке

Ниже (табл.1) приведены фотографии искрообразования в зависимости от длительности импульса.

Таблица 1





Серия опытов, проведенных при напряжении ГИН 36 кВ и различной длительности импульса (рис.11, 12)

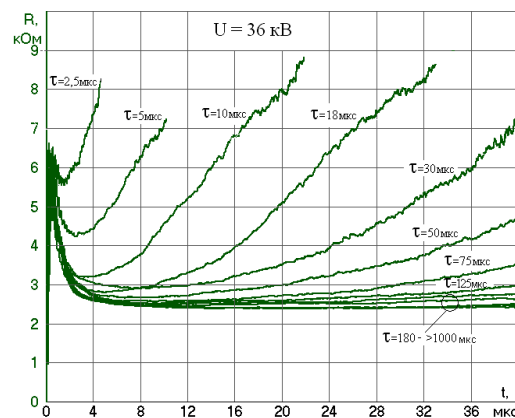
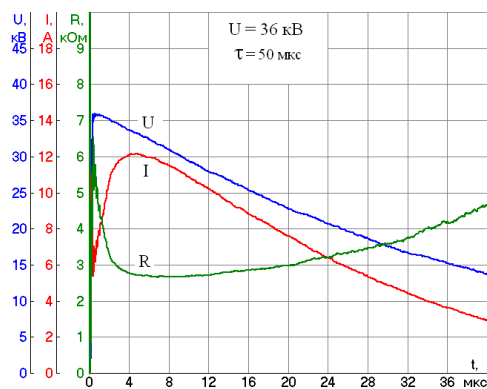
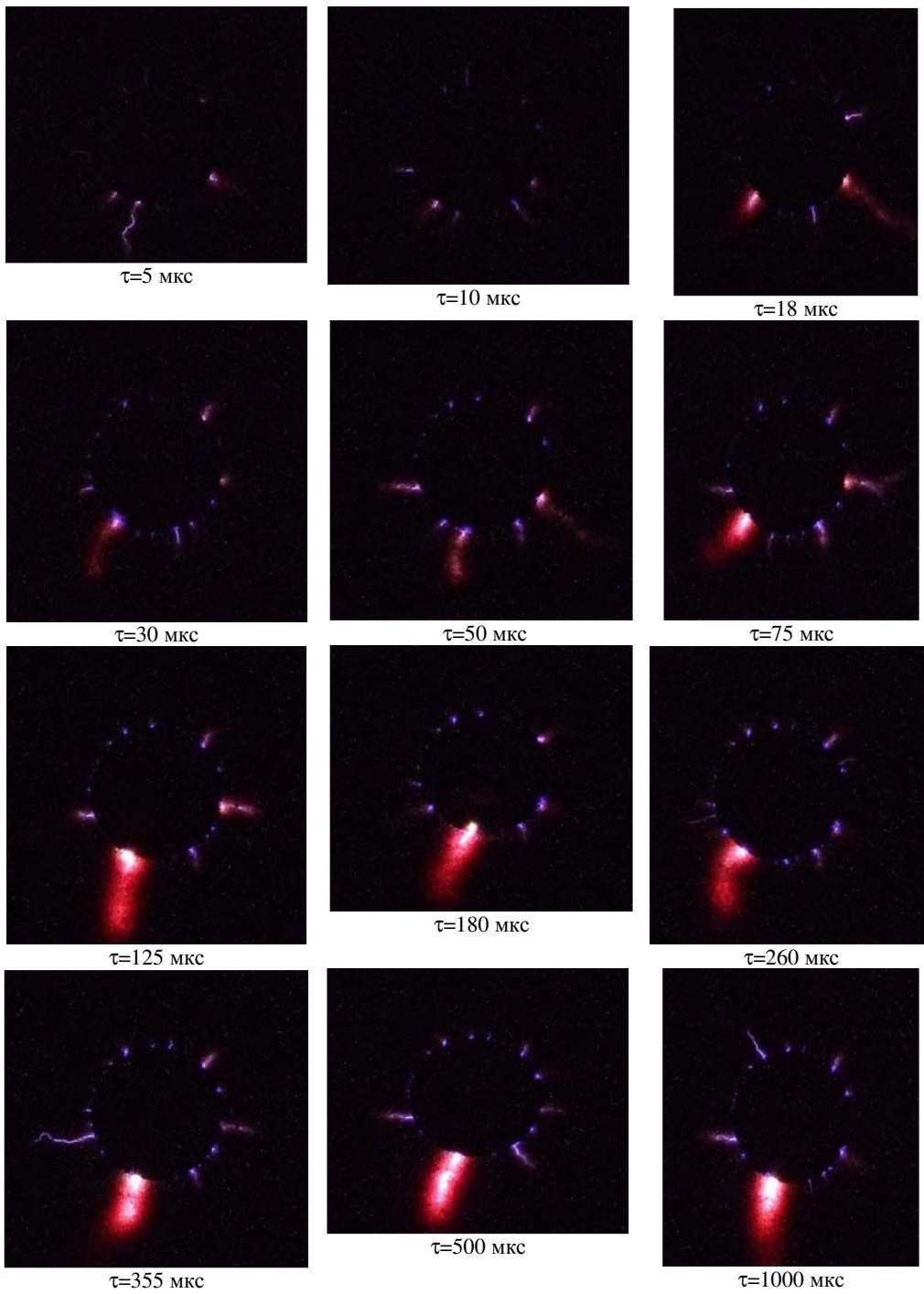


Рис.11. Пример осциллограммы  $U$ ,  $I$ ,  $R$  при  $\tau=RC=50$  мкс

Рис.12. Зависимости сопротивления электродной системы, определяемой как отношение напряжения к току, от длительности импульса на нагрузке

Ниже (табл.2) приведены фотографии искрообразования в зависимости от длительности импульса.

Таблица 2





**Серия опытов, проведенных при напряжении ГИН 42 кВ и различной длительности импульса (рис.13, 14)**

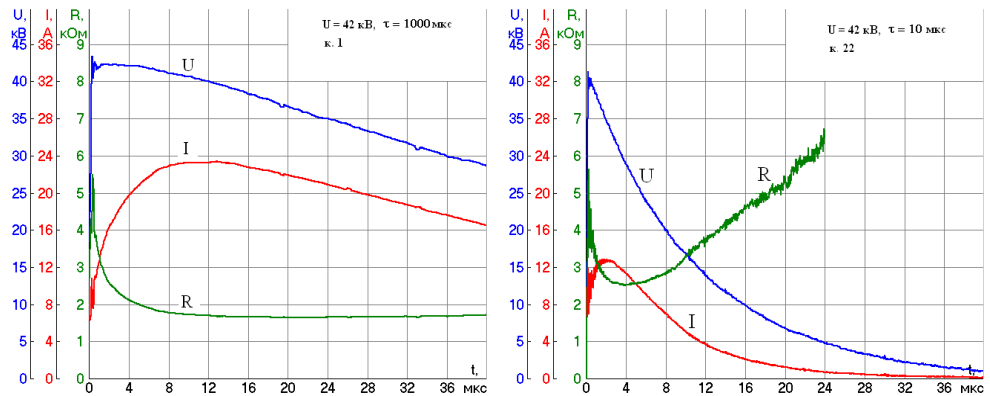


Рис.13. Примеры осциллограммы U, I, R при разных  $\tau=RC$  (10-1000 мкс)

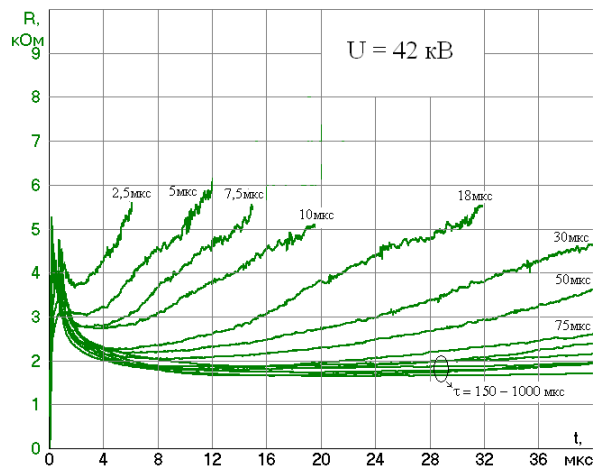
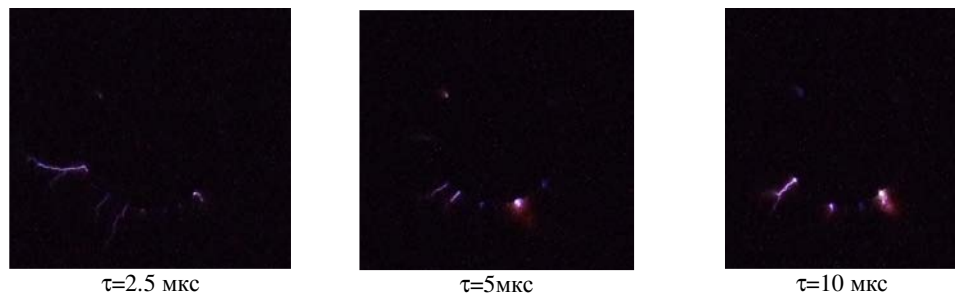


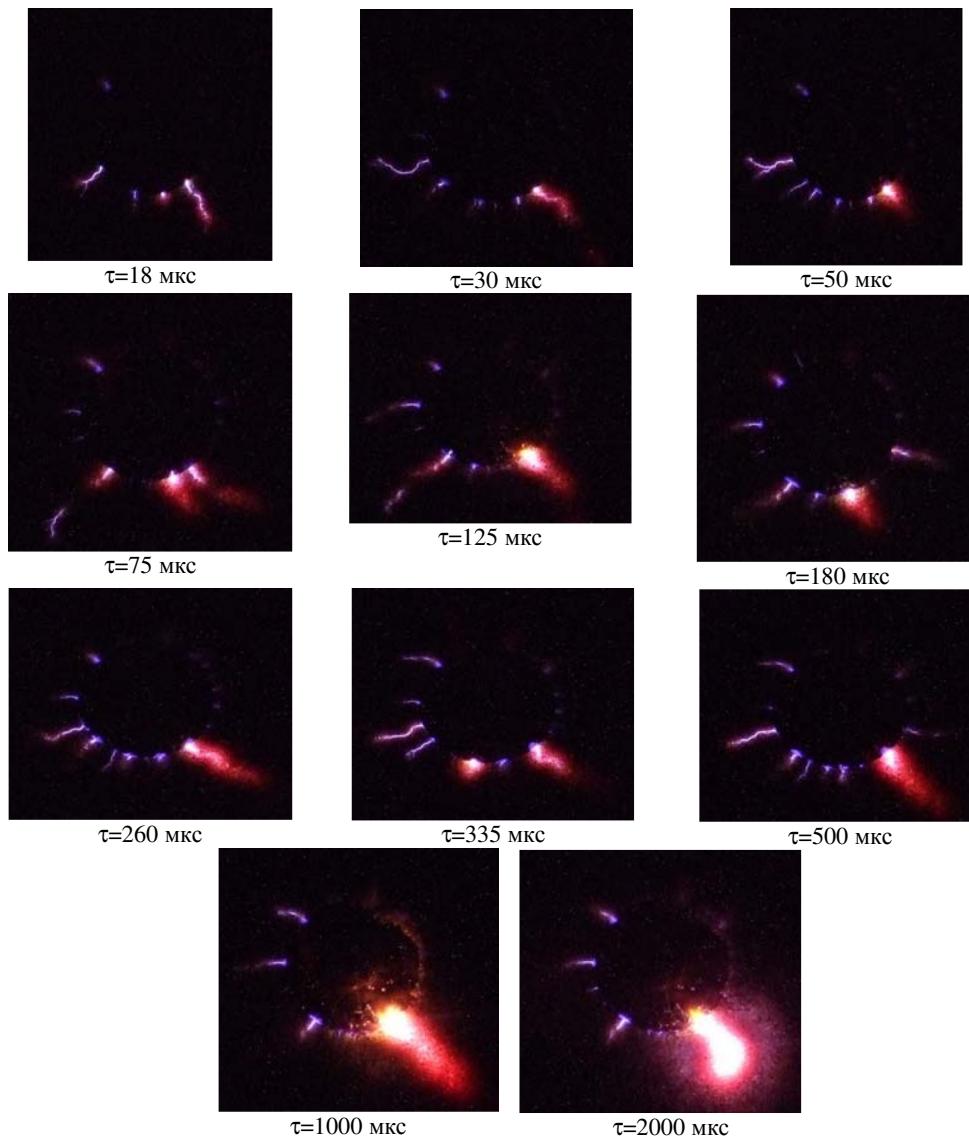
Рис.14. Зависимости сопротивления электродной системы, определяемой как отношение напряжения к току, от длительности импульса на нагрузке

Ниже (табл.3) приведены фотографии искрообразования в зависимости от длительности импульса.

Таблица 3



Окончание табл.3



### Выводы по результатам исследований с электродной системой в виде диска

1. В опытах сделана совместная оценка изменения сопротивления электродной системы, размещенной в увлажненном грунте, и уровня искрообразования в грунте вокруг электрода (оптические наблюдения) в зависимости от длительности импульса напряжения и его амплитуды. Показано, что эти параметры имеют между собой хорошую корреляцию.
2. Приведенные зависимости сопротивления электродной системы от длительности импульса на нагрузке имеют хорошо выраженный спад и последующее восстановление по мере убывания напряжения. Длительность спада пропорциональна длительности импульса  $\tau=RC$ .
3. Наблюдаемая интенсивность искрообразования (фото этих процессов приведены в таблицах) растет и становится более яркой с ростом длительности импульса.

4. Импульсное сопротивление электрода в грунте зависит от уровня напряжения (ср. рис.10, 12, 14). С ростом напряжения примерно пропорционально снижается значение установившегося сопротивления электрода в грунте.

Процессы, связанные с изменением сопротивления электродной системы в увлажненном грунте, характерны для любых форм электродов. В данных опытах наиболее хорошо отслеживается корреляция визуализированной части опытов.

Несмотря на то что в электродной системе с однородным полем (шаровой электрод) наблюдать искровые процессы не удается, осциллографирование показывает, что, судя по изменению сопротивления электродной системы, искровой процесс в грунте имеет место.

#### Специальная электродная система с резко неоднородным полем

Электрод, имеющий профиль уголка 35x50 мм (рис.15), размещен во влажном песке и внутри сосуда касается стекла. Толщина уголка 1 мм, влажность грунта – 10%

Задача опыта – получить визуальную картину искрообразования в грунте вокруг заземлителя, имеющего профиль уголка. Прокат в виде уголка часто применяется в вертикальных заземляющих устройствах наряду с трубами. Вместе с фоторегистрацией искрообразования выполнено осциллографирование электрических параметров.

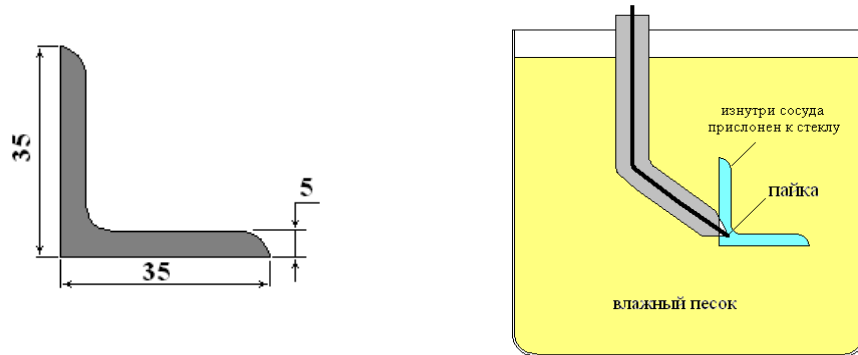


Рис.15. Параметры уголка и его размещение в сосуде с влажным песком

#### Серия опытов, проведенных при напряжении ГИН 30 кВ и различной длительности импульса

На рисунке 16 приведены осциллограммы токов и напряжений при различной длительности импульсов. Можно отметить, что они весьма схожи с осциллограммами для дисковых электродов, которые также имеют резко неоднородное поле в окружающей среде.

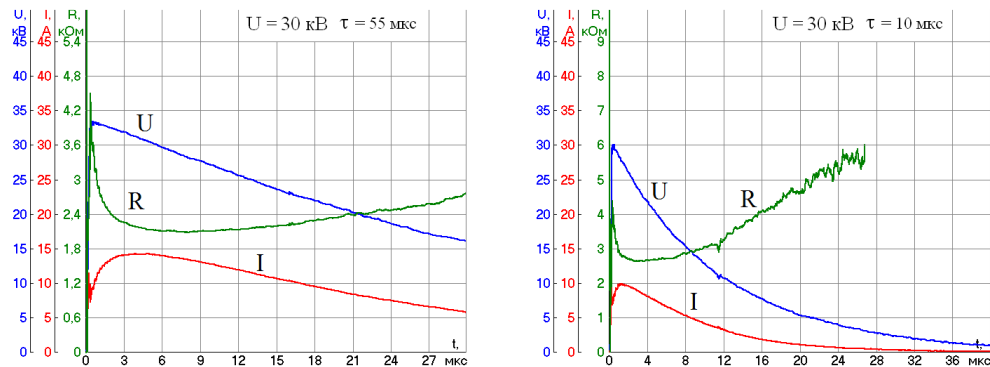


Рис.16. Пример осциллограмм U, I, R при  $\tau=RC$  (10-5 мкс)

На рисунке 17 приведены примеры фоторегистрации искрообразования в грунте при напряжении 30 кВ,  $\tau=510$  мкс и влажности грунта 10%. Здесь А – одиночный импульс, Б – наложение восьми импульсов. Показано, что процесс наиболее интенсивен в местах с наибольшей неоднородностью поля.

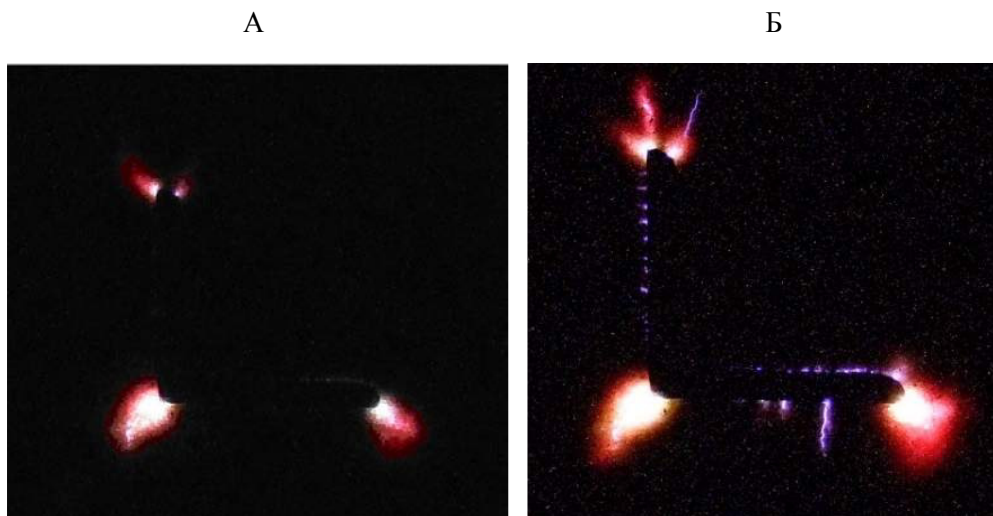


Рис.17. Примеры фоторегистрации искрообразования в грунте при  $\tau=510$  мкс

Приведенные на рис.18 зависимости сопротивления электродной системы от длительности импульса также показывают схожесть процессов в системах с резко неоднородным полем.

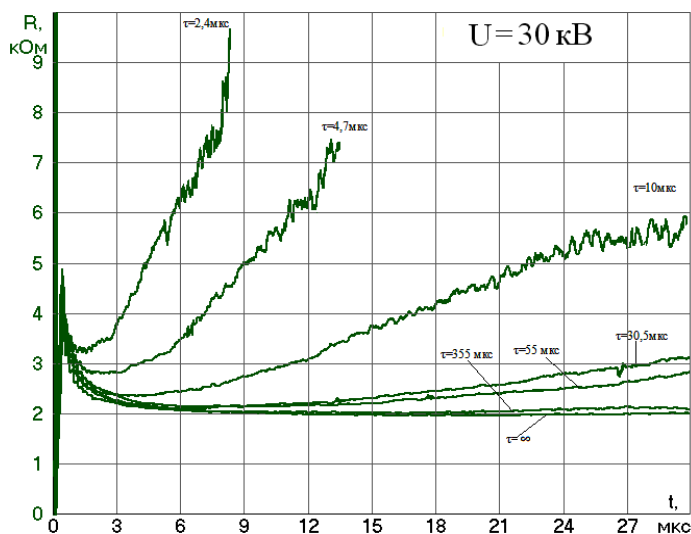


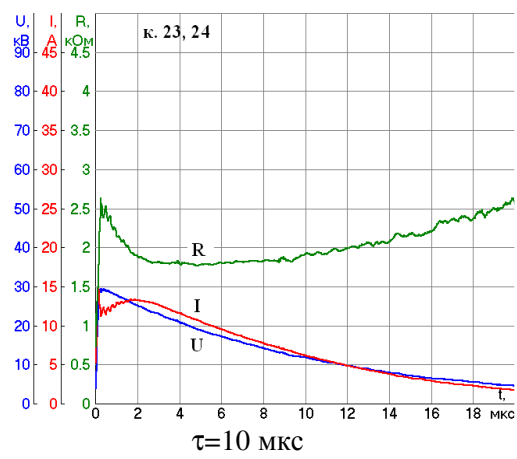
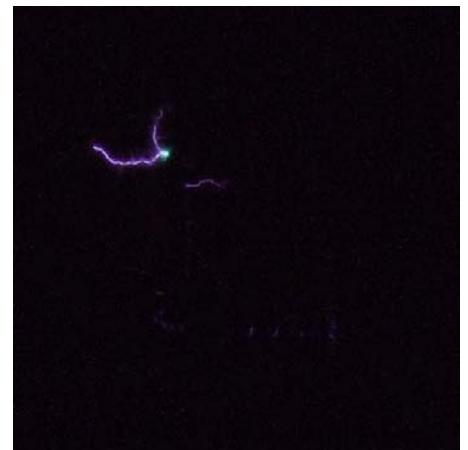
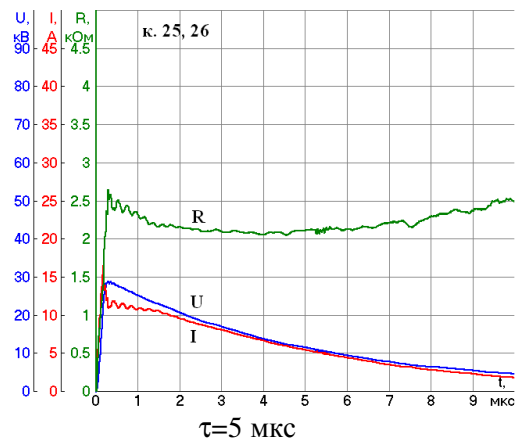
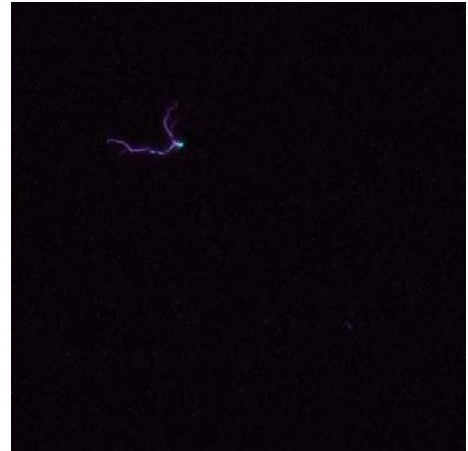
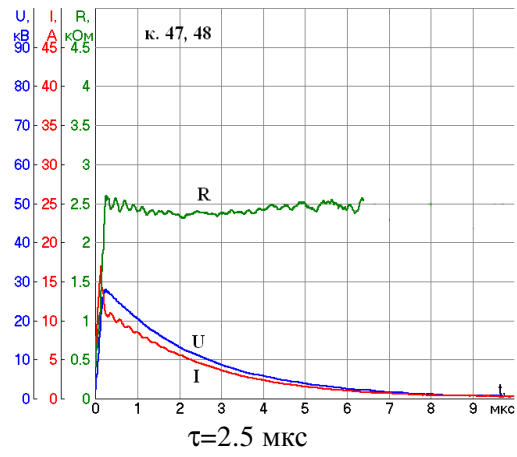
Рис.18. Зависимости сопротивления электродной системы от длительности импульса

В следующем разделе приведены результаты оптических наблюдений при влажности грунта 20%. Сравнение процессов искрообразования при двух влажностях показывают, что процессы могут иметь различный характер.

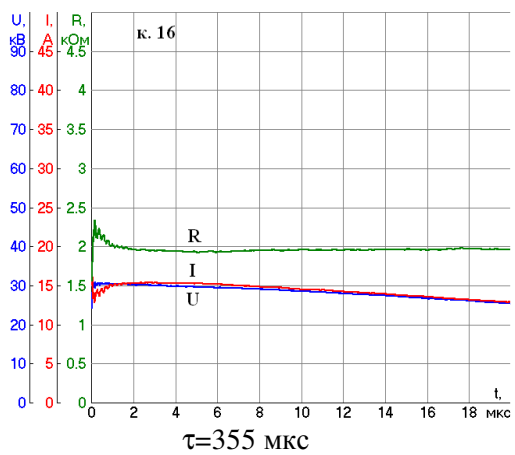
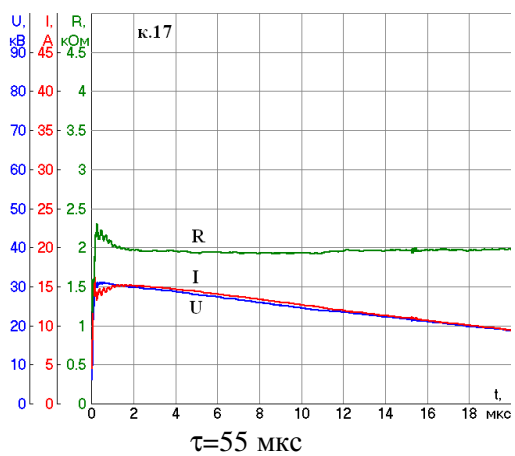
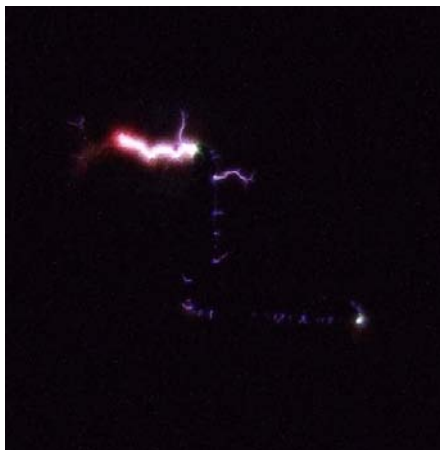
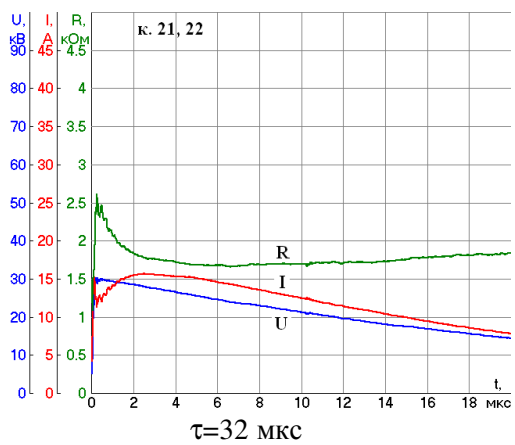
**Серия опытов при напряжении ГИН 30 кВ и изменении длительности импульса**

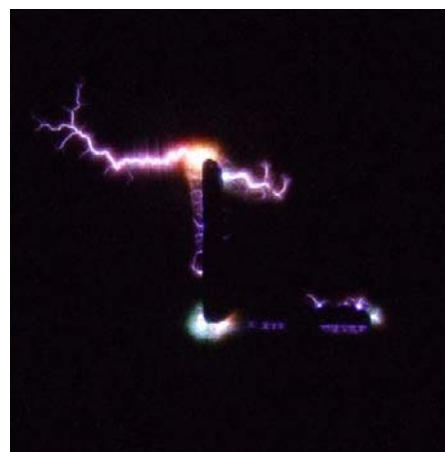
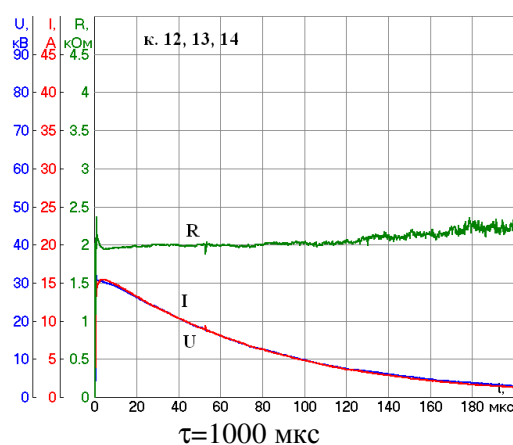
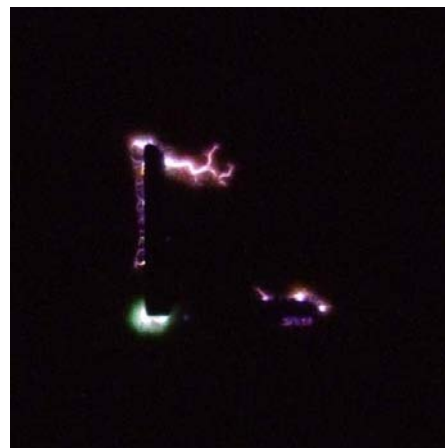
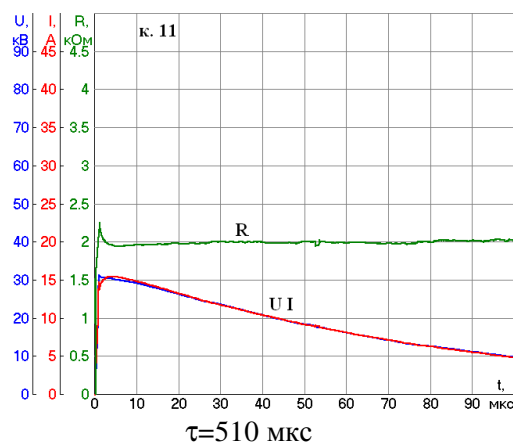
Влажность грунта – 20% (табл.4).

Таблица 4



Продолжение табл.4





### Комментарий к опытам с электродом, имеющим профиль уголка

1. Поле у электрода резко неоднородное. Напряженности на остриях велики даже при сравнительно низких напряжениях, и начало искрообразования практически не имеет задержки. Однако процесс стабилизации искрообразования довольно длительный – 2-4 мкс.

2. Изменения сопротивления электрода в зависимости от длительности импульса сильно выражены, как и интенсивность искрообразования, зафиксированного оптическими методами.

3. Характер искровых процессов у электрода в зависимости от влажности грунта имеет значительные отличия. При малой влажности (10%) искрообразование носит факельный характер, при повышенной влажности (20%) – образуются протяженные искровые каналы.

### Выводы

Приведенные результаты лабораторных исследований искрообразования вокруг электрода, размещенного в увлажненном грунте при воздействии импульсов высокого напряжения позволяют сделать предварительные выводы.

1. Процесс образования искровой зоны в грунте вокруг электрода, увеличивающий поверхность стекания и соответственно снижающий сопротивление электрода относительно грунта, является процессом крайне медленным относительно времени нарастания напряжения. На коротких импульсах этот процесс вообще не успевает развиваться даже при напряжениях, значительно превышающих порог начала искрообразования в грунте. Это показано на приведенных зависимостях  $R = f(t, \tau_p)$ .

2. Указанная зависимость является также функцией влажности грунта. При меньших влажностях процесс развития искрообразования и соответственно изменение  $R$  носит ступенчатый характер. При больших влажностях процесс изменения происходит плавно, при этом он более длительный.

3. При однородных полях вблизи электрода наблюдается запаздывание начала искрообразования при напряженностях поля, превышающих напряженность начала искрообразования. Время запаздывания в зависимости от напряжения в интервале от 1 до 5 мкс.

4. Оптические наблюдения процесса искрообразования показали, что его интенсивность зависит от длительности импульса и уровня напряжения. При меньшей влажности искрообразование имеет факельный характер, при большей влажности искровые каналы в грунте имеют вид дендритов.

Данные исследования необходимо продолжить в реальных грунтах на полигонах на заземлителях объектов.

## **Литература**

1. 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 Кольского научного центра РАН. Энергетика. – 2011. – № 2(5). – С. 39-54.
2. Данилин А.Н. Экспериментальное моделирование импульсных процессов в элементах заземляющих устройств / А.Н.Данилин, В.Н.Селиванов // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. – 2012. – №1(8). – С. 25-38.
3. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения / Е.Я.Рябкова. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.
4. Техника высоких напряжений / под ред. М.В.Костенко. – М.: Высш. шк., 1973. – 528 с.

## **Сведения об авторах**

### **Данилин Аркадий Николаевич**

заведующий лабораторией высоковольтной электроэнергетики и технологии  
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,  
кандидат технических наук  
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

### **Куклин Дмитрий Владимирович**

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



УДК 621.311

Д.А.Джура, В.Н.Селиванов

## ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

### Аннотация

Представлен аналитический обзор приборов для измерения импульсных характеристик заземляющих устройств электроустановок.

### Ключевые слова:

импульсное сопротивление, заземляющее устройство, схема замещения.

D.A.Djura, V.N.Selivanov

## INSTRUMENTS TO MEASURE IMPULSE RESPONSE OF GROUNDING

### Abstract

An analytical survey of field tools to measure impulse response of power equipment grounding is given.

### Keywords:

impulse impedance, grounding, equivalent circuit.

Одним из факторов, влияющих на надежность защиты электроустановок в условиях плохопроводящих грунтов, является величина импульсных сопротивлений заземляющих устройств (ЗУ) подстанций и опор линий электропередачи (ЛЭП) на подходах. Импульсное сопротивление заземлителя – величина комплексная, в схему замещения входят также реактивные элементы. Простейшая схема замещения

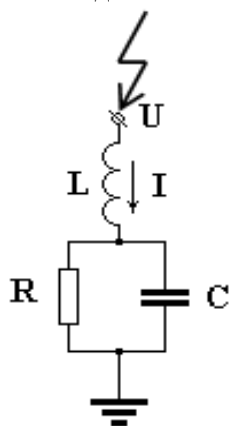


Рис.1. Схема замещения сосредоточенного заземлителя при импульсном воздействии

заземлителя при импульсном воздействии показана на рис.1.

В первые микросекунды после прихода импульса перенапряжения на оборудовании определяются индуктивностью заземляющей ошиновки  $L$ , локальной емкостью  $C$  и переходным сопротивлением  $R$  ближнего участка заземлителя. В [1] введено понятие локального импульсного заземления – расчетной, динамически изменяющейся во времени величины, равной отношению мгновенных значений импульсного напряжения на заземлителе и импульсного тока через него  $Z(t) = \frac{U(t)}{I(t)}$ , при временах, не превышающих

первых единиц микросекунд, когда можно считать, что растекание происходит лишь с ближней зоны заземляющего устройства аппарата и не охватывает все ЗУ электроустановки. По сути это мгновенное

сопротивление, величина и форма которого зависит от формы импульсного воздействия. В [2] оперируют понятием переходного сопротивления, которое численно равно напряжению на ЗУ при воздействии единичного скачка тока и определяется по осциллограммам напряжения  $U(t)$  для любого испытательного импульса тока  $I(t)$ . Информация о переходном сопротивлении используется для синтеза схемы замещения ЗУ.

В эксплуатации использование временных зависимостей не всегда удобно и оправданно, обычно стремятся охарактеризовать состояние оборудования каким-либо конкретным параметром. Для заземляющих устройств при низкочастотном воздействии используется понятие стационарного сопротивления  $R$ . Для импульсного воздействия такой общепринятой характеристики нет. В работе [3] дается несколько определений импульсных сопротивлений, которые можно проиллюстрировать рис.2:

$Z_1 = \max(Z(t))$  – максимальное значение мгновенного сопротивления;

$Z_2 = \frac{U(t_1)}{I(t_1)}$  – сопротивление в момент  $t_1$  максимума напряжения;

$Z_3 = \frac{U(t_1)}{I(t_2)}$  – отношение максимальных значений падения напряжения и

тока, причем эти величины могут достигаться в различные моменты времени [4];

$Z_4 = \frac{U(t_2)}{I(t_2)}$  – сопротивление в момент  $t_2$  максимума тока (как указывается в [5],

именно этот параметр следует использовать для расчета грозозащиты).

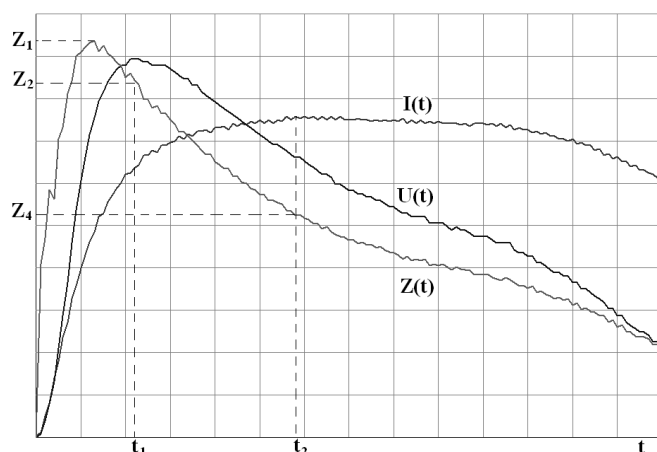


Рис.2. Экспериментальные кривые тока и напряжения на ЗУ и расчетное мгновенное сопротивление (к определению понятия импульсного сопротивления)

В [3] показано, что по крайней мере для сосредоточенных заземлителей выполняется условие  $Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4 > R$ . Однако в работе [6] исследована взаимосвязь между импульсными и стационарными сопротивлениями при различных проводимостях грунтов и показано, что в грунтах с плохой проводимостью сопротивление в импульсном режиме может быть меньше установившегося значения. Это подтверждается экспериментами по исследованию сопротивлений заземлителей опор воздушных линий (ВЛ), сооруженных на скалистых грунтах [7] (характерная осциллограмма представлена на рис.3). С ростом удельного сопротивления грунта растет активное сопротивление и все большую роль начинает играть емкостная составляющая. Кроме того, при определенных соотношениях емкостного и индуктивного сопротивлений могут возникать колебательные процессы, как показано на осциллограмме на рис.4.

Разработка новых средств экспериментального определения импульсных характеристик заземляющих устройств признана актуальной как научно-исследовательскими организациями [8], так и электроэнергетическими компаниями [9].

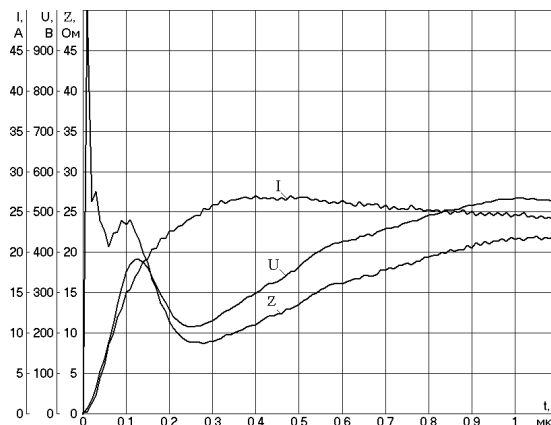


Рис.3. Кривые тока, напряжения и сопротивления при емкостном характере сопротивления заземлителя

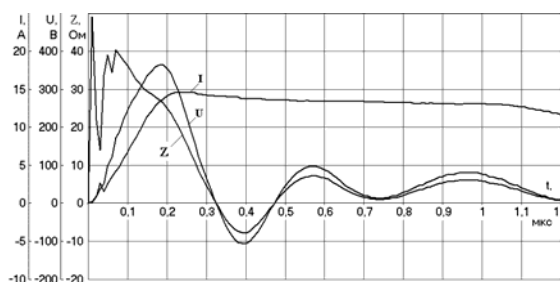


Рис.4. Иллюстрация колебательных процессов в ЗУ

Прототипы подобных устройств давно используются при выполнении научно-исследовательских работ [10-12]. Экспериментальная установка, как правило, состоит из генератора импульсных сигналов (серийного или специально изготовленного), первичных преобразователей тока и напряжения, протяженных проводников для подключения токового и потенциального электродов и цифрового осциллографа (автономного или в комплексе с компьютером). Результатом измерений являются кривые тока и напряжения на ЗУ, для обработки которых используются различные алгоритмы. Работа с таким программно-аппаратным комплексом требует специальной научной подготовки и определенного исследовательского энтузиазма. В условиях промышленной эксплуатации требуется законченное устройство с минимальным количеством составляющих единиц и соединений, с предельно ясным алгоритмом получения и последующего использования результата измерений.

Разработка такого устройства ведется в ЦФТПЭС КНЦ РАН в сотрудничестве с СПбГПУ и НИИПТ. Предлагается новый подход к решению всего комплекса задач грозозащиты, основанный на повышении адекватности расчетных моделей ЗУ, применении нового экспериментального оборудования и современного математического и программного обеспечения. Предлагается перейти от существующей резистивной модели ЗУ, описываемой стационарным сопротивлением, к  $RLC$ -моделям, а также моделям, включающим элементы с распределенными параметрами, учитывающими реальный активно-реактивный характер сопротивления ЗУ на частотах грозового импульса. Ведется разработка автономного аппаратно-измерительного комплекса, предназначенного для экспериментального определения и исследования стационарного сопротивления и импульсных характеристик ЗУ опор линий электропередач (с грозозащитным тросом и без него) и распределительных устройств.

Работы в этом направлении также активно ведутся и за рубежом, причем уже сейчас предлагаются коммерческие разработки, в большей или меньшей степени отвечающие задаче измерения импульсных характеристик ЗУ. Ниже приводится краткий обзор устройств, информация о которых имеется в свободном доступе.

### Тестер импульсных импедансов *PET-7*

Тестер импульсных импедансов был разработан компанией *Hokkei Industries* (г.Хакусан, Япония) для измерения полного сопротивления ЗУ опор ЛЭП. Первое обнаруженное упоминание относится к 2003 г. и описывает модификацию тестера *PET-5* (есть файл, загруженный нами ранее, но документ уже удален с сайта компании). С 2008 г. выпускается модификация *PET-7* [13], которая и будет описана ниже.

Тестер *PET-7* состоит из генераторно-измерительного блока весом 6 кг и набора принадлежностей весом 13 кг, в который входят батарея питания и калибровочное сопротивление, размещенные в одном корпусе, 10 заземляющих электродов длиной 440 мм, две катушки провода длиной по 65 м и соединительные проводники и кабели (рис.5).

Лицевая панель генераторно-измерительного блока показана на рис.6. Тестер питается от восьми батарей типоразмера *D*, обеспечивающих напряжение 12 В в течение 1 ч непрерывной работы (имеется возможность подключения к внешнему источнику питания 12 В, например бортовой сети автомобиля). На выходе блока генерируется импульс постоянного тока амплитудой 0.4 А, со временем нарастания 1 мкс и длительностью 256 мкс (рис.7). Напряжение на нагрузке не превышает 1500 В. Диапазон измеряемых сопротивлений разбит на три поддиапазона: 1-20 Ом, 20-200 Ом, 200-999 Ом. Процесс измерения и обработки данных управляется 32-разрядным центральным процессором.



Рис.5. Общий вид тестера импульсных импедансов *PET-7* (<http://www.sankosha-usa.com/graphics/surge-1.jpg>)

Рис.6. Лицевая панель тестера импульсных импедансов *PET-7* [13]:

- 1 – жидкокристаллический дисплей;
- 2 – кнопки управления;
- 3 – кнопка запуска измерений;
- 4 – тумблер включения питания;
- 5 – предохранитель;
- 6 – зажимы для подключения источника питания;
- 7 – зажим для подключения токового электрода;
- 8 – зажим для подключения потенциального электрода;
- 9 – зажим для подключения заземляющего устройства;
- 10 – печатающее устройство

Схема измерения основана на известном способе измерения сопротивлений (метод трех электродов) и показана на рис.8. К зажиму *Tower* проводом длиной не более 2.5 м подключается заземляющее устройство опоры. К зажимам *C-wire* и *V-wire* подключаются проводники длиной по 65 м, которые разматываются с катушек в противоположные стороны перпендикулярно оси фазных проводов ЛЭП. Концы токового и потенциального проводников присоединяются к группам из пяти погруженных в землю электродов, расположенных на расстоянии 1.5 м друг от друга и соединенных между собой проводниками. В токовый контур подается импульс тока, при этом измеряется напряжение на ЗУ опоры относительно потенциального электрода. Процесс измерения напряжения и тока длится в течение 1 мкс, причем можно задавать центральный момент времени  $tm$  (рис.7), когда производится измерение, из следующего временного ряда: 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30 мкс. При измерении сопротивлений ЗУ опор ЛЭП без отсоединения гроззащитного троса обычно задают время 1 или 3 мкс, чтобы избежать влияния отраженных от соседних опор сигналов. Результатом процесса измерения является отношение среднего значения напряжения, достигнутого в течение выборки длительностью 1 мкс, к значению тока (оно задается источником тока). Результат измерения, время измерения и значения уставок сохраняются во внутренней памяти (до 500 измерений), отображаются на жидкокристаллическом дисплее, а также распечатываются встроенным печатающим устройством (чековый термопринтер). Данные из внутренней памяти могут быть переписаны в персональный компьютер через интерфейс *USB*. Кроме того, с помощью программного обеспечения *PET-Navigator* можно посредством компьютера программировать некоторые опции генераторно-измерительного блока, например, устанавливать время и место проведения измерений, необходимые для протокола.

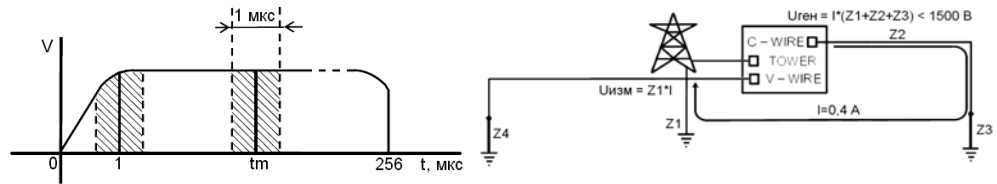


Рис.7. Кривая импульса напряжения на выходе тестера импульсных импедансов PET-7 [13]

Рис.8. Схема измерения импульсного сопротивления опоры линии электропередач [13]

В [14] описана также более современная модификация тестера *PET-7*, внешний вид которого показан на рис.9. В этой модификации аккумуляторная батарея и калибровочное сопротивление размещены в общем корпусе с генераторно-измерительным блоком.

Как справедливо указано в описании устройства [14], сопротивление заземляющего устройства носит комплексный характер и поэтому форма волны напряжения не будет подобна форме тока. На рис.10 показаны характерные формы сигналов напряжений при емкостном, индуктивном и резонансном характере сопротивления ЗУ. Очевидно, что показания тестера будут отличаться для различных центральных моментов времени  $tm$ . Серия измерений, выполненных в моменты 1, 2, 3 мкс, позволит, вероятно, приблизительно оценить характер сопротивления заземления опоры. Таким образом, прибор *PET-7* следует, скорее всего, отнести к разновидности измерителей импульсного сопротивления  $Z_3$ , так как значения тока и напряжения измеряются не в фиксированный момент времени, а могут соответствовать разным отсчетам в пределах выборки.

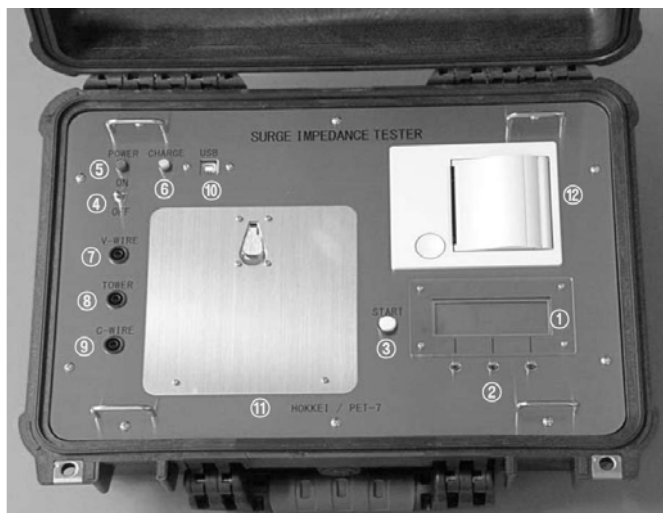


Рис.9. Внешний вид модификации тестера импульсных импедансов PET-7 [14]:  
 1 – жидкокристаллический дисплей; 2 – кнопки управления; 3 – кнопка запуска измерений; 4 – тумблер включения питания; 5 – индикатор питания; 6 – индикатор зарядки; 7 – зажим для подключения потенциального электрода; 8 – зажим для подключения заземляющего устройства; 9 – зажим для подключения токового электрода; 10 – разъем интерфейса USB; 11 – батарейный отсек; 12 – печатающее устройство

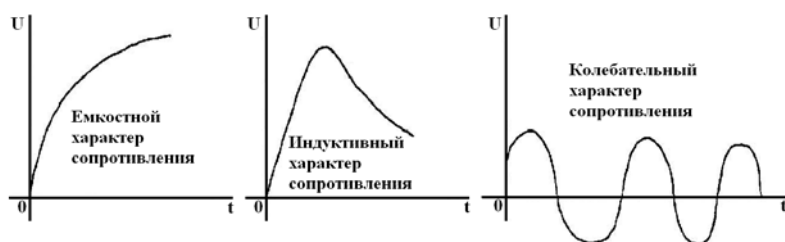


Рис.10. Характерные формы напряжения на заземляющем устройстве [14]

### Измеритель импульсных сопротивлений WG-407

Измеритель импульсных сопротивлений WG-407 производится польской компанией *ATMOR s.c.* [15]. Процедура измерения величины импульсного сопротивления соответствует определению  $Z_3$ , данному в Европейском стандарте *IEC 61024-1* [4]: «отношение максимальных значений падения напряжения и тока, причем эти величины могут достигаться в различные моменты времени». Характерные осциллограммы импульсов тока и напряжения, генерируемых измерителем, показаны на рис.11. Импульс тока имеет амплитуду до 1 А и длительность фронта порядка 4 мкс. Максимальное значение напряжения на ЗУ не превышает 1000 В, при этом диапазон измеряемых сопротивлений лежит в пределах 0-200 Ом. Частота следования – 5 импульсов в секунду. Результатом измерения является отношение пиковых значений напряжения и тока – импульсное сопротивление ЗУ. Результат фиксируется во внутренней памяти прибора емкостью 126 значений.

Общий вид прибора показан на рис.12. Генераторно-измерительный модуль выполнен в едином модуле размером 100x195x40 мм и весом 0.4 кг. Встроенный источник питания напряжением 4.8 В обеспечивает выполнение 1000 измерений. В комплект входят также две катушки с проводом длиной 40 и 30 м для подключения токового и потенциального электродов, два заземляющих электрода длиной 0.6 м. Сопротивление потенциального и токового электродов не должно превышать 1000 Ом, в противном случае измеритель выдает ошибку.

Схема измерений представлена на рис.13. В описании прибора указано, что областью его применения является в том числе измерение сопротивления опор без отсоединения грозотроса. Однако при фронте 4 мкс и скорости пробега волны 300 м/мкс отраженные волны от соседних опор вернутся еще на фронте импульса тока, что исказит результат измерения. Несмотря на то что прибор есть в продаже (стоимостью порядка 15000 руб.), отсутствует информация об опыте его эксплуатации, поэтому трудно оценить эффективность использования данного метода измерения.

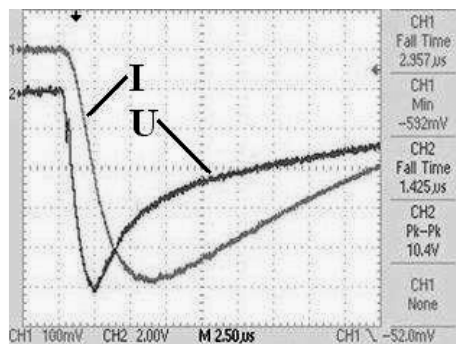


Рис.11. Осциллограммы тока, генерируемого измерителем WG-407, и напряжения на заземляющем устройстве ([http://www.atmor.pl/english\\_files/image006.jpg](http://www.atmor.pl/english_files/image006.jpg))

Рис.12. Общий вид измерителя импульсных сопротивлений WG-407 (16)

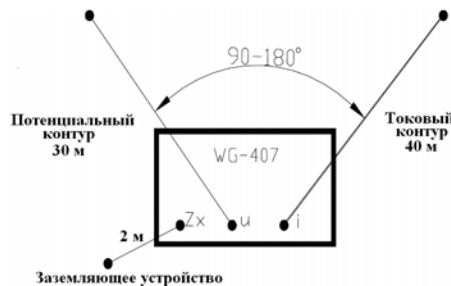


Рис.13. Схема измерения импульсного сопротивления заземления [16]

### Проект ZED-meter

Разработка программно-измерительного комплекса ZED-meter ведется в Институте электроэнергетических исследований EPRI с 2004 г. [17]. Разработка до сих пор поддерживается, однако в эксплуатацию прибор еще не внедрен и в свободной продаже отсутствует. В свободном доступе информации по комплексу мало, в основном она касается результатов выполненных измерений [11, 18]. Некоторое представление о внешнем виде прибора можно получить из рис. 14.

В состав комплекса входят генератор импульсов, датчики тока и напряжения, аналого-цифровой преобразователь, персональный компьютер со специализированным программным обеспечением, коаксиальные кабели для подключения токового и потенциального электродов. На выходе генератора на холостом ходу формируется прямоугольный импульс амплитудой до 200 В и длительностью 1.4 мкс (рис.15).

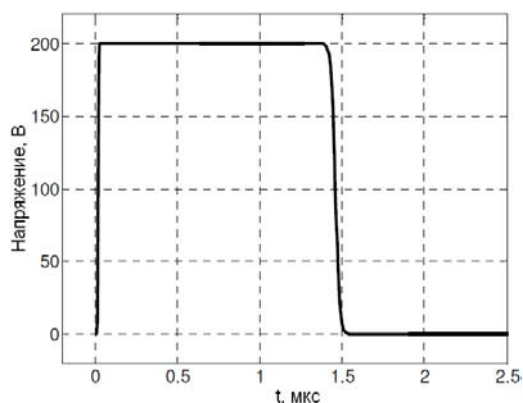


Рис.14. Внешний вид комплекса ZED-meter [18]

Рис.15. Форма импульса напряжения на выходе генератора ZED-meter [19]

Схема измерений такая же, как в предыдущих методах (см. рис.8 и 13), угол между токовым и потенциальным проводниками составляет  $90^{\circ}$  для уменьшения их взаимного влияния. Прибор имеет три разъема для подключения к заземляющему устройству опоры и к токовому и потенциальному электродам. В качестве токового и потенциального проводников используется оболочка коаксиальных кабелей с волновым сопротивлением порядка 400 Ом и длиной по 60 м. Такая длина выбрана, чтобы обеспечить время двойного пробега по проводнику больше 0.44 мкс. Ток измеряется широкополосным трансформатором тока (вероятно, поясом Роговского).

Проблема измерения импульсных характеристик состоит не столько в получении мгновенных зависимостей тока и напряжения на ЗУ, сколько в последующей обработке этих сигналов и получении значимых для эксплуатации результатов. В проекте ZED-meter наибольшее внимание уделяется именно разработке алгоритмов цифровой обработки сигналов. Входящий в состав программно-измерительного комплекса компьютер используется как для управления генератором, так и для обработки входных данных и визуализации результатов. На рис.16 показан снимок с экрана компьютера, демонстрирующий результаты измерений высокоомной опоры ЛЭП. Можно видеть информацию о месте проведения измерений, амплитуде импульса напряжения, форме вычисленного мгновенного сопротивления  $Z_2(t)$ , величине стационарного сопротивления  $R$  и стандартного отклонения его определения по результатам нескольких измерений (в приведенном примере обработаны результаты 10 измерений).

В отличие от приборов PET-7 и WG-407, ZED-meter позволяет получить не только значение импульсного сопротивления ЗУ, но и увидеть кривую мгновенного сопротивления и оценить по ней импульсные характеристики ЗУ. Однако нет информации о том, можно ли с помощью ZED-meter получить какие-либо количественные оценки параметров схемы замещения заземлителей.



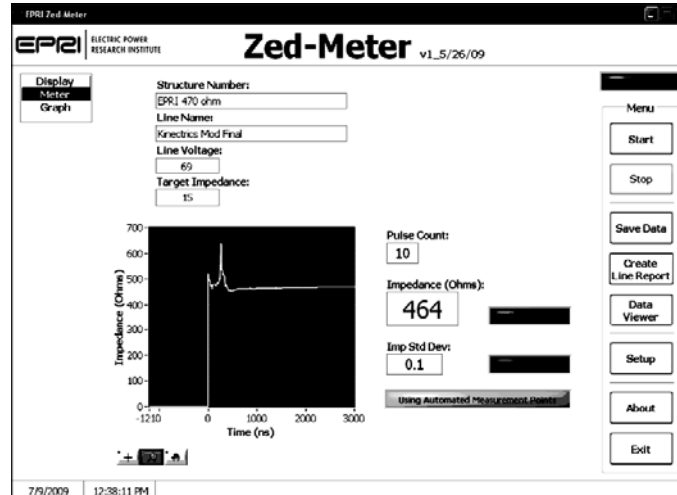


Рис.16. Снимок экрана с программой EPRI Zed-meter [18]

## Выводы

1. Предлагаемые в настоящее время приборы, принцип действия которых основан на импульсном воздействии на ЗУ, в реальности предназначены для получения единственной импульсной характеристики: либо сопротивления  $Z_3$  (*PET-7*, *WG-407*), либо значения стационарного сопротивления сосредоточенных заземлителей (*ZED-meter*) (например опор ЛЭП без отсоединения грозозащитного троса).

2. Необходимо разработать программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий получение набора импульсных характеристик, адекватно отражающих поведение заземляющего устройства при грозовом воздействии и позволяющих синтезировать простейшие схемы замещения для использования их при анализе молниезащиты электроустановок.

## Литература

1. Методика и результаты измерений локальных импульсных сопротивлений заземлителей оборудования подстанций / А.Н.Данилин, В.В.Колобов, В.Н.Селиванов, П.И.Прокопчук // Сборник докладов 9-й Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности «ЭМС-2006», г.Санкт-Петербург, 20-22 сентября 2006 г. – СПб.: ВИТУ, 2006. – С. 426-430.
2. Анализ результатов измерений сопротивления заземления опор ВЛ с тросом при модернизации заземляющих устройств / А.Н.Новикова, А.Н.Лубков, О.В.Шмараго, Л.И.Галкова, В.Р.Бельцер, О.А.Прохореня, С.И.Кривошеев, А.П.Ненашев, А.А.Парфентьев // Электрические станции. – 2007. – № 9. – С. 53-59.
3. Behaviour of a grounding system under impulse lightning current / I.F.Gonos, M.K.Antoniou, F.V.Topalis, I.A.Stathopoulos // VI International Conference and Exhibition on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM '98), May, 1998, Brasov, Romania. P. 171-174 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.researchgate.net/publication/3763541\\_Behaviour\\_Of\\_A\\_Grounding\\_System\\_Under\\_Impulse\\_Lightning\\_Current/file/79e4150a8fe29d1762.pdf](http://www.researchgate.net/publication/3763541_Behaviour_Of_A_Grounding_System_Under_Impulse_Lightning_Current/file/79e4150a8fe29d1762.pdf)
4. МЭК 61024-1: 1990 Защита объектов от молнии. Ч.1. Общие принципы.
5. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения / Е.Я.Рябкова. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.

6. Герасимович Д.А. Математическое моделирование импульсных характеристик вертикальных стержневых заземлителей / Д.А.Герасимович, Е.А.Дерюгина // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика: междунар. науч.-техн. жур. – 2012. – № 1. – С. 5-8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/bitstream/data/2857/1/9-16.pdf>
7. Данилин А.Н. Исследование локальных импульсных сопротивлений протяженных подземных проводников / А.Н.Данилин, Д.В.Куклин, В.Н.Селиванов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 1(95). – С. 250-254.
8. Решения III Российской Конференции по молниезащите [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.streamer.ru/events/58> [http://www.streamer.ru/files/File/decision\\_IPRCLP.pdf](http://www.streamer.ru/files/File/decision_IPRCLP.pdf)
9. Группа молодых ученых под руководством профессора Николая Коровкина победила в конкурсе «Энергетика будущего» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.energo-info.ru/2011-11-08-20-23-16/2011-11-16-14-56-28/22002-----1-r.html>
10. Методика импульсных измерений сопротивления растеканию заземлителей опор высоковольтных линий электропередачи под грозозащитным тросом / А.Н.Данилин, В.В.Колобов, В.Н.Селиванов, П.И.Прокопчук // Технико-экономические и электрофизические проблемы развития энергетики Севера. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2007. – С. 79-85.
11. Chisholm W.A. Comparison of low frequency resistance and lightning impulse impedance on transmission towers / W.A.Chisholm, E.Petrache, F.Bologna // X International Symposium on Lightning Protection, 9-13 November 2009, Curitiba, Brazil. P. 329-334 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ws9.iee.usp.br/SipdaXI/papers/X/sessao\\_03/174.pdf](http://ws9.iee.usp.br/SipdaXI/papers/X/sessao_03/174.pdf)
12. Идентификация  $RLC$ -параметров заземляющих устройств опор воздушных линий с тросом импульсным методом / С.И.Кривошеев, Ю.Н.Бочаров, Н.В.Коровкин, К.И.Нетреба, С.Л.Шишигин // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Вып.1. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2010. – С. 26-32.
13. Operation manual for single-impedence tester type-Pet-7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pands.co.kr/images/products/catalog/PET-7OPERATIONMANUALa.pdf>
14. Surge impedance tester model: Pet-7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.pands.co.kr/2010/bbs/downloadFiles.html?bo\\_table=pns\\_product\\_7&wr\\_id=1&num=101&file=2+PET-7+%BB%E7%BF%EB%BC%B3%B8%ED%BC%AD.pdf](http://www.pands.co.kr/2010/bbs/downloadFiles.html?bo_table=pns_product_7&wr_id=1&num=101&file=2+PET-7+%BB%E7%BF%EB%BC%B3%B8%ED%BC%AD.pdf)
15. Wojtas S. Impulse measurement of lightning protection earthing impedances / S.Wojtas, M.Woloszyk, M.Galevski [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atmor.pl/english.htm>
16. Earthing impulse meter type WG-407. User manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.atmor.pl/User\\_manual\\_WG407.pdf](http://www.atmor.pl/User_manual_WG407.pdf)
17. EPRI Portfolio 2013 – 35 Overhead Transmission [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://mydocs.epri.com/docs/Portfolio/PDF/2013\\_P035.pdf](http://mydocs.epri.com/docs/Portfolio/PDF/2013_P035.pdf)
18. Chisholm W.A. Panel paper 2010TD0683: Grounding of overhead transmission lines // Panel Session on Lightning Performance of Overhead Lines, 2010 IEEE T&D Expo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ieeepes.org/images/pes-ws/td2010/slides/td2010p-000683.pdf>
19. Petrache E. Evaluating the transient impedance of transmission line towers / E.Petrache, W.A.Chisholm, A.Phillips // IX International Symposium on Lightning Protection, 26-30 November 2007, Foz do Iguaçu, Brazil [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ws9.iee.usp.br/sipdax/papersix/sessao08/8.2.pdf>

### **Сведения об авторах**

#### **Джура Дмитрий Алексеевич**

студент Кольского филиала Петрозаводского государственного университета  
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, ул.Космонавтов, д.3  
эл. почта: dzhura@email.com

#### **Селиванов Василий Николаевич**

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

УДК 621.311

### **М.Б.Баранник, В.В.Колобов**

## **РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ТОКА С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

### **Аннотация**

Рассмотрены преимущества применения импульсных источников тока на основе индуктивного накопителя энергии в экспериментальных установках для измерения импульсных сопротивлений заземляющих устройств. Приведена схема источника с индуктивным накопителем и описан принцип работы.

### **Ключевые слова:**

*генератор импульсов тока, индуктивный накопитель энергии, заземляющее устройство, импульсное сопротивление.*

### **M.B.Barannik, V.V.Kolobov**

## **DEVELOPMENT OF CURRENT PULSE GENERATOR WITH INDUCTIVE ENERGY STORAGE TO MEASURE IMPULSE RESPONSE OF GROUNDING**

### **Abstract**

Applying advantages of inductive pulse generator for measuring grounding impulse response are described. Some aspects of electronic circuit design and electronic components of the device are presented.

### **Keywords:**

*current pulse generator, inductive energy storage, grounding, impulse impedance.*

Одним из факторов, влияющих на надежность защиты электроустановок, является величина импульсных сопротивлений заземляющих устройств (ЗУ) подстанций и опор линий электропередачи. Под локальным импульсным сопротивлением заземления понимается расчетная величина, равная отношению мгновенных значений импульсного напряжения на заземлителе и импульсного тока через него, при временах, не превышающих первых единиц микросекунд, когда растекание происходит лишь с ближней зоны заземляющего устройства аппарата и не охватывает все заземляющие устройства электроустановки [1]. Так как при импульсных воздействиях не существует такой общепринятой характеристики заземляющих устройств, как понятие стационарного сопротивления  $R$  при низкочастотных воздействиях [2], то для определения импульсных характеристик заземляющих устройств необходимо иметь кривые тока и напряжения на ЗУ, которые затем могут обрабатываться с помощью различных алгоритмов. Примеры экспериментальных кривых тока и напряжения на ЗУ и расчетного мгновенного сопротивления приведены в [2].

Методика экспериментального определения импульсных характеристик заземляющих устройств основана на способе измерения сопротивлений методом трех электродов [3, 4]. В состав экспериментальной установки входят генератор импульсных токов, два протяженных проводника, которые в случае импульсных измерений образуют токовую и потенциальную линии, первичные датчики тока и напряжения, цифровой двухканальный осциллограф. Генератор формирует в токовой линии импульсы с необходимыми амплитудными и временными характеристиками. Исходными данными для вычисления импульсного сопротивления заземления являются зарегистрированные цифровым осциллографом формы импульсов тока и напряжения в соответствующих линиях. В качестве генератора используется импульсный источник тока на основе емкостного накопителя. В ходе работ по разработке и совершенствованию методики измерений локальных импульсных сопротивлений заземлителей оборудования подстанций и ЛЭП в ЦФТПЭС КНЦ РАН было спроектировано и изготовлено несколько действующих макетов генераторов импульсных токов с емкостным накопителем энергии. Опыт их применения показал, что существует ряд факторов, которые приводят к искажению формы анализируемых импульсов тока и напряжения и затрудняют достоверное определение импульсного сопротивления заземления.

Одним из таких факторов является неравномерное распределение волнового сопротивления вдоль токовой линии. На рис.1 приведены осциллограммы кривых тока и напряжения на ЗУ и расчетное мгновенное сопротивление. Перегиб кривой тока в районе 0.3 мкс вызван значительным изменением волнового сопротивления на соответствующем участке токовой линии.

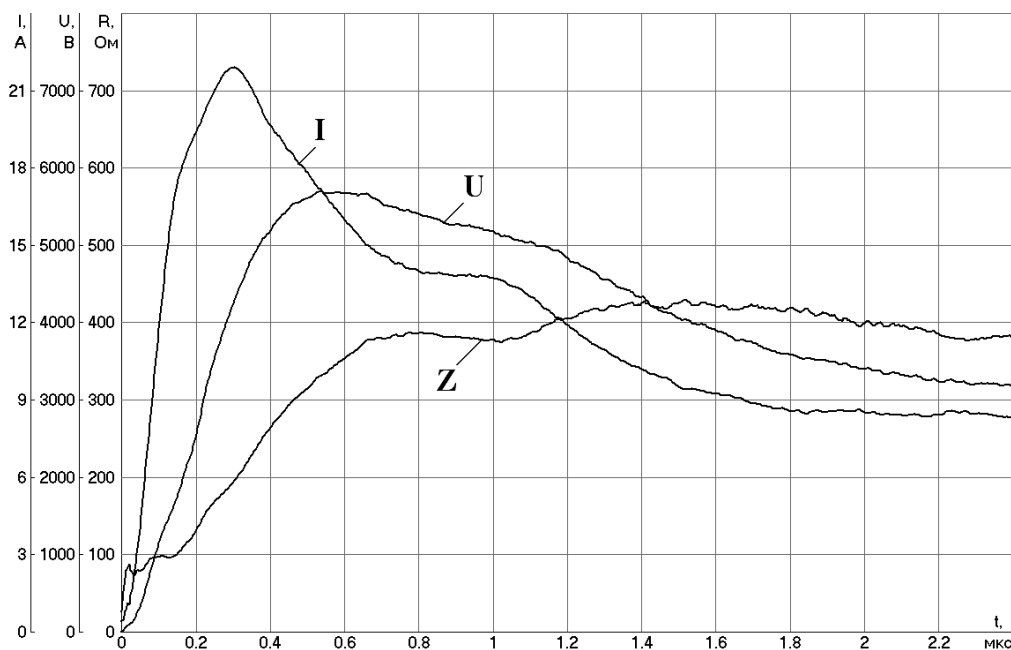


Рис.1. Экспериментальные кривые тока и напряжения на ЗУ и расчетное мгновенное сопротивление в случае неравномерного распределения волнового сопротивления вдоль токовой линии

Другим фактором, искажающим форму импульса тока, является наличие отражения волны от конца токовой линии при отсутствии согласования. Отсутствие согласования может быть вызвано как разомкнутой на конце линией (режим холостого хода), так и неравенством величины сопротивления заземления на конце линии  $Z_{3l}$  и волнового сопротивления токовой линии  $Z_{wl}$ , составляющего величину порядка 400 Ом. На рис.2 на кривой тока при времени 0.9 мкс наблюдается резкий перегиб, вызванный отражением волны тока из-за отсутствия согласования на конце линии ( $Z_{3l} > Z_{wl}$ ). На рис.1 такой перегиб выражен в меньшей степени, что свидетельствует о том, что линия достаточно хорошо согласована ( $Z_{3l} \approx Z_{wl}$ ).

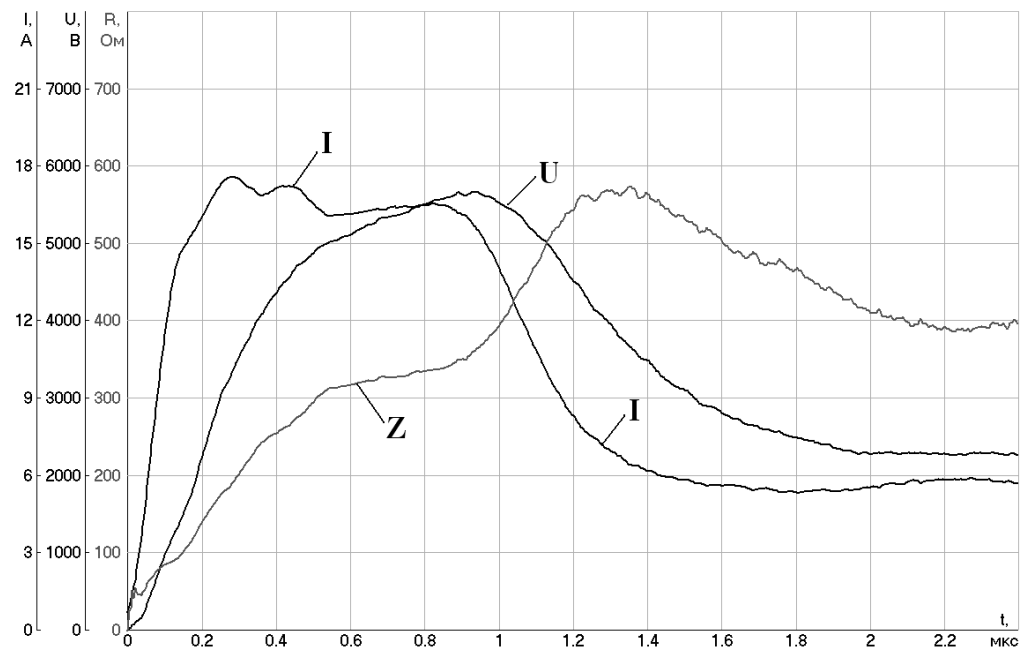


Рис.2. Экспериментальные кривые тока и напряжения на ЗУ и расчетное мгновенное сопротивление для случая плохого согласования токовой линии и наличия отраженной волны

Кроме того, в условиях грунтов с высоким удельным сопротивлением, когда сопротивление заземлителя может достигать нескольких сотен Ом, растет постоянная времени переходного процесса в заземлителе  $\tau$ , для которой можно записать:

$$\tau \sim C_3 \cdot R_3,$$

где  $C_3$  и  $R_3$  – эквивалентные емкость и сопротивление заземлителя. В этом случае фронты регистрируемых импульсов напряжения затягиваются (рис.3 в работе [2]) и время двойного пробега волны по токовой и потенциальной линии может оказаться существенно меньше величины  $3 \cdot \tau$ , что приводит к возникновению на плато импульсов искажений, вызванных отражением от концов линии, и, соответственно, к невозможности определения параметров ЗУ.

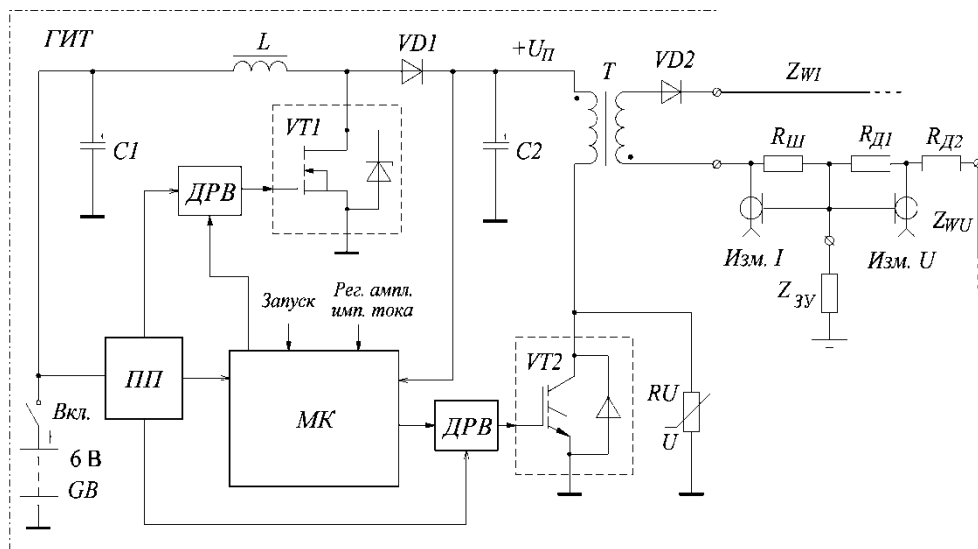


Рис.3. Функциональная схема источника тока с индуктивным накопителем энергии для измерения импульсных сопротивлений заземляющих устройств: ГИТ – генератор импульсных токов; ПП – преобразователь питания; МК – микроконтроллер; ДРВ – драйверы управления IGBT- и MOSFET-ключами

Чтобы избежать описанных выше искажений, необходимо обеспечить постоянство формы импульса в токовой линии независимо от степени ее согласования и распределения волнового сопротивления вдоль нее. Такое постоянство формы импульса тока может быть обеспечено применением в качестве генератора источника тока с индуктивным накопителем энергии.

В настоящее время исследования по разработке и созданию импульсных источников тока с индуктивным накопителем проводятся в основном в области высоких энергий. Известно, что индуктивные накопители многократно превосходят емкостные накопители по запасаемой удельной энергии, что резко уменьшает их сравнительные габариты, вес и стоимость. Это обстоятельство является решающим при создании накопителей с большими энергиями [5]. Известные высоковольтные и сильноточные источники импульсов применяются для питания импульсных ускорителей электронных пучков, источников рентгеновского и нейтронного излучения, лазеров, а также в устройствах для обработки поверхности различных материалов. Исследования ведутся в направлении повышения эффективности передачи энергии в нагрузку, что определяется в основном схемными решениями источников и конструктивно-технологическим исполнением индуктивного накопителя. Кроме того, исследуются различные варианты коммутирующих устройств индуктивных накопителей энергии, в особенности ключа, разрывающего зарядный ток как наиболее критичного компонента схемы источников, формирующих мощные импульсы наносекундной длительности. В сверхмощных устройствах такой ключ должен в наносекундном диапазоне времени отключать токи величиной в несколько кА и выдерживать напряжения порядка  $10^6$  В. В качестве разрывающего ток ключа в таких устройствах применяются взрывные и плазменные прерыватели, в устройствах меньшей мощности – разрядники, тиратроны, тиристоры. Более современные твердотельные приборы в накопителях больших энергий пока не находят применения.

В разрабатываемом источнике тока для измерения импульсных сопротивлений заземляющих устройств определяющим фактором применения схемы с индуктивным накопителем энергии является описываемый законами коммутации принцип непрерывности во времени потокосцепления в индуктивности [6]. Согласно принципу непрерывности запас энергии магнитного поля в катушке индуктивности и ток в индуктивности не могут измениться скачком. Следовательно, генератор импульсных токов на основе индуктивного накопителя способен обеспечить при изменяющихся параметрах нагрузки постоянство амплитуды импульса тока в линии в интервале времени, достаточном для проведения измерений.

Функциональная схема источника тока для измерения импульсных сопротивлений заземляющих устройств на основе индуктивного накопителя энергии приведена на рис.3. Основными элементами генераторов импульсных токов на основе индуктивных накопителей являются сам индуктивный накопитель энергии и размыкатель тока. В качестве индуктивного накопителя выступает трансформатор  $T$ , а в качестве ключа – транзистор  $VT2$ . Генератор построен по схеме обратного преобразователя [7]. В таком преобразователе фаза накопления энергии и фаза передачи ее в нагрузку разделены во времени и трансформатор  $T$  является по сути двухобмоточным накопительным дросселем [8]. В фазе накопления энергии индуктивным накопителем транзистор  $VT2$  открыт. Ток в индуктивности первичной обмотки трансформатора  $T$  будет нарастать до тех пор, пока управляющий контроллер (МК) не даст команду на выключение транзистора  $VT2$ . После закрытия  $VT2$  полярность напряжения на выводах трансформатора  $T$  вследствие самоиндукции меняется на противоположную, открывается диод  $VD2$  и накопленная в индуктивном элементе энергия поступает в нагрузку (фаза передачи энергии). В линии, подключенной к выходу генератора, формируется импульс тока. При этом на первичной обмотке индуктивного элемента  $T$  возникает выброс напряжения  $U_L$ . Это напряжение значительно превышает напряжение питания  $U_{\Pi}$  транзистора  $VT2$ . Напряжение на выводах ключевого элемента  $VT2$  составит величину  $U_{\text{кп}}=U_L+U_{\Pi}$ . Исходя из величины  $U_{\text{кп}}$  выбирается класс напряжения транзистора  $VT2$ . Для предотвращения потенциального пробоя ключа  $VT2$  в случае обрыва нагрузки (токовой линии) в схеме используется защитный варистор  $RU$ .

В качестве  $VT2$  оптимальным является применение новейших типов  $IGBT$ -транзисторов, имеющих высокую пропускную способность по току и малое время переключения, что увеличивает эффективность передачи энергии из накопителя в нагрузку и позволяет формировать выходные импульсы тока с фронтами длительностью первые сотни наносекунд.

Для увеличения добротности индуктивного накопителя  $T$  целесообразно использовать сердечник из магнитных материалов на основе смеси порошкового никеля и железа или сплава железа с алюминием. Такие материалы обладают высокой индукцией насыщения, малыми потерями на высоких частотах, низкой магнитной проницаемостью.

Так как разрабатываемый генератор питается от низковольтного гальванического элемента (аккумулятора), то для формирования необходимой величины напряжения  $U_{\Pi}$  заряда индуктивного накопителя в схеме используется импульсный повышающий преобразователь на основе элементов  $L$ ,  $VT1$ ,  $VD1$  и  $C2$ . Для управления силовыми ключами индуктивного накопителя ( $VT2$ ) и повышающего преобразователя ( $VT1$ ) применены специальные драйверные микросхемы (ДРВ). Микроконтроллер МК обеспечивает формирование сигнала управления ключом индуктивного накопителя и выполняет функции ШИМ-контроллера повышающего преобразователя. Преобразователь питания (ПП) формирует необходимые уровни напряжений для питания микроконтроллера и драйверных схем.

Необходимо отметить, что кроме обеспечения постоянства формы импульса в токовой линии источник тока на основе индуктивного накопителя обладает еще одним преимуществом по сравнению с источниками на основе емкостных накопителей – он является управляемым. Если в ГИТ на основе емкостного накопителя выходной импульс тока формируется, как правило, неуправляемым высоковольтным коммутатором, то в разрабатываемом генераторе формирование выходного импульса тока (запуск) можно осуществлять как с помощью встроенных органов управления, так и цифровым сигналом синхронизации от внешнего устройства управления. При этом точность привязки начала импульса тока к сигналу синхронизации составляет единицы наносекунд. Кроме того, регулируя длительность фазы заряда индуктивного накопителя, можно изменять запасаемую энергию и следовательно амплитуду выходного импульса тока.

Управляемость генератора тока на основе индуктивного накопителя позволяет использовать его в автоматизированных системах экспериментального определения импульсных характеристик заземляющих устройств. В таких системах в одном конструктивно законченном блоке размещаются генератор тока, первичные датчики, устройства аналого-цифрового преобразования, записи импульсов тока и напряжения, процессор вычисления импульсных параметров ЗУ, устройство визуального отображения измеряемых величин [2].

## **Выводы**

1. При использовании в составе установки для экспериментального определения импульсных параметров заземляющих устройств источника тока на основе емкостного накопителя формы импульсов тока и напряжения могут быть сильно искажены из-за неравномерного распределения волнового сопротивления вдоль токовой линии и наличия отражений от ее конца. Кроме того, в условиях грунтов с высоким удельным сопротивлением в начале импульсов напряжения возникают длительные переходные процессы. Искажения формы анализируемых импульсов затрудняют достоверное определение импульсного сопротивления заземления.

2. Применение в качестве генератора импульсного источника тока на основе индуктивного накопителя энергии позволяет получить практически неискаженную форму импульса тока в линии и тем самым обеспечить измерение импульсного сопротивления заземления с высокой степенью точности.

3. Импульсный источник тока на основе индуктивного накопителя может иметь внешнее управление, позволяет с точностью до единиц наносекунд синхронизировать момент запуска и регулировать энергетические параметры выходного импульса тока, что дает возможность использовать его в автоматизированных устройствах экспериментального определения импульсных характеристик заземляющих устройств.

## **Литература**

1. Методика и результаты измерений локальных импульсных сопротивлений заземлителей оборудования подстанций / А.Н.Данилин, В.В.Колобов, В.Н.Селиванов, П.И.Прокопчук // Сборник докладов XI Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности «ЭМС-2006», г.Санкт-Петербург, 20-22 сентября 2006 г. – СПб.: ВИТУ, 2006. – С. 426-430.
2. Джура Д.А. Приборы для измерения импульсного сопротивления заземляющих устройств / Д.А.Джура, В.Н.Селиванов. Статья в настоящем сборнике.
4. Данилин А.Н. Исследование локальных импульсных сопротивлений протяженных подземных проводников / А.Н.Данилин, Д.В.Куклин, В.Н.Селиванов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 1(95). – С. 250-254.



5. Измерение сопротивлений заземляющих устройств опор высоковольтных линий с тросом импульсным методом / Ю.Н.Бочаров, Н.В.Коровкин, С.И.Кривошеев, С.Л.Шишигин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – Т.1, № 89. – С. 115-121.
6. Каштанов В.В. Генерация мощных электрических импульсов / В.В.Каштанов, А.В.Сапрыгин // Теоретическая физика. – 2008. – Т.8. – С. 188-200.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л.А.Бессонов. – М.: «Гардарика», 2007. – 701 с.
8. Макашов Д. Обратногоходовой преобразователь / Д.Макашов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bludger.narod.ru/smps/Flyback-R01.pdf> (дата обращения: 10.10.2013).
9. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному / Б.Ю.Семенов. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 416 с.

### *Сведения об авторах*

#### **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

#### **Колобов Виталий Валентинович**

ведущий научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии  
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,  
кандидат технических наук  
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д.21А  
эл. почта: l\_i@mail.ru

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

---

УДК 621.311

**А.В.Бурцев, Ю.М.Невретдинов**

## **РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ\***

### **Аннотация**

Показана необходимость разработки генераторно-измерительного комплекса для обследования характеристик каналов эмиссии грозových перенапряжений в силовых трансформаторах в действующих сетях. Описаны требования к комплексу и с его помощью проведены первичные обследования силового трансформатора 110 кВ.

### **Ключевые слова:**

*генераторно-измерительный комплекс, силовой трансформатор, импульсные характеристики.*

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

## **DEVELOPMENT OF GENERATOR-MEASUREMENT COMPLEX FOR SURVEYING POWER TRANSFORMER IMPULSE CHARACTERISTICS**

### **Abstract**

Necessity of generator-measuring complex for survey of lightning overvoltages distribution channels characteristics in power transformers in the existing power grids is shown. Requirements to the complex are described. The primary surveys of the 110 kV power transformer have been conducted by instrumentality of this complex.

### **Keywords:**

*generator-measurement complex, power transformer, impulse characteristics.*

Системы контроля электромагнитных воздействий и диагностирования объектов предполагают наличие известных характеристик, соответствующих контролируемым воздействиям. В частности, для контроля атмосферных перенапряжений на изоляции силовых трансформаторов необходимы соответствующие импульсные характеристики каналов распространения этих воздействий [1]. В настоящее время считается, что для точного описания передаточных функций любого объекта достаточно их представление в виде амплитудо-фазочастотных характеристик (АФЧХ). Например, для канала эмиссии грозových перенапряжений в сеть, подключенную к обмотке низкой стороны трансформатора, достаточно иметь АФЧХ канала распространения этих воздействий «ввод высокой стороны – ввод низкой стороны». Эта методика используется, в частности, для прогнозирования перенапряжений в нейтрали силовых трансформаторов [2, 3].

Экспериментальная проверка перспективы использования частотного метода выполнена при натуральных импульсных испытаниях в действующей сети ряда подстанций. В экспериментах на подключенной ЛЭП генерировался импульс напряжения, а измерения выполнены на вводах силовых трансформаторов и в нейтрали [4, 5].

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-00690).

При проведении экспериментов в действующем ОРУ 330 кВ автотрансформаторы имеют глухое заземление нейтрали. Поэтому контроль реакции на импульсное напряжение был возможен только для тока в неразъемной заземляющей шине. Измерения выполнялись с помощью пассивного электромагнитного датчика (ЭМД) и активного датчика (АДГ), использующего эффект Холла. По результатам измерений датчик на эффекте Холла показал существенное искажение регистрируемого сигнала, что объясняется прохождением сигнала через емкостные связи. Этот вывод подтвержден измерениями этим же датчиком с отключенным питанием.

Расшифровка результатов регистраций с помощью датчика ЭМД показали неоднозначность интерпретации результатов измерений с помощью частотного метода. Проверка прямой и обратной интерпретации частотным методом выполнена благодаря тому, что в экспериментах форма импульсного напряжения на вводах силового трансформатора существенно различалась в зависимости от моделирования действия защитного аппарата [4]. Таким образом, сделан вывод о невозможности применения частотного метода для описания импульсных характеристик автотрансформатора в направлении эмиссии сигнала «ввод 330 кВ – заземленная нейтраль».

По результатам лабораторных исследований импульсных характеристик датчика ЭМД установлено, что его передаточная функция «измеряемый ток – напряжение на выходе» также неудовлетворительно описывается частотным методом. Поэтому выводы экспериментальных исследований в ОРУ 330 кВ нельзя однозначно распространять на передаточные характеристики автотрансформатора. Таким образом, в цитируемом эксперименте показана неоднозначность частотной интерпретации передаточной функции системы «автотрансформатор – датчик тока ЭМД», а не самого автотрансформатора.

Для контроля импульсных характеристик силового трансформатора необходимо обследование с выводом его из работы. С целью проведения контрольных измерений на действующем силовом трансформаторе, временно выведенном из работы, необходима была разработка генераторно-измерительного комплекса (ГИК) и соответствующих требований к нему.

Основными задачами разрабатываемого ГИК являются:

- проведение нестандартизованных исследований характеристик каналов распространения электромагнитных воздействий в силовом электрооборудовании, которое по предварительным данным можно отнести к объектам, имеющим, наряду со свойствами сосредоточенных электротехнических элементов, волновые свойства объектов с неравномерно распределенными параметрами по направлению распространения воздействия;

- выявление областей неоднозначности характеристик и формирование воздействий в выявленной области неоднозначности;

- исследование возможности существенного расширения объема информативности исследований при сокращении времени исследований (эта задача включает возможность обследования одновременно нескольких каналов распространения электромагнитного воздействия, а также выявление областей неоднозначности и их детализацию).

Задачи первого этапа:

- контрольные обследования передаточных функций действующего силового трансформатора для однозначного выявления проблемы неоднозначности характеристик (зависимости от параметров воздействия) и возможности применения частотного метода или его адаптации;

- выявление диапазонов варьирования воздействий, влияющих на объем измерений;

- выявление неоднородностей (резонансов и других явлений), при которых существенно снижается шаг дискретизации параметров воздействия (тестового сигнала) и увеличиваются объем и время обследований;

- выявление возможности автоматизации обследований;
- требования к помехозащищенности и погрешности измерений;
- обобщение требований к безопасности и оперативности обследований.

Спецификой объекта обследования (силовых трансформаторов и автотрансформаторов) являются:

- нахождение в действующем высоковольтном устройстве (ОРУ, ЗРУ и т.п.), т.е. в зоне действия электромагнитных полей силовых электроустановок с возможным коронированием с проводов;

- большие габариты, исключающие создание малоиндуктивных измерительных цепей;

- значительное ограничение времени проведения обследований (вывода объекта из работы);

- большое количество каналов распространения тестовых воздействий (между фазами одной обмотки, между обмотками, фаза – нейтраль) с варьированием режима нейтрали и подключений к обмоткам;

- наличие подключений, которые по условиям работы объекта или по требованиям техники безопасности не могут быть отключены.

Исходя из специфики обследуемого объекта, при разработке ГИК должны быть учтены следующие требования.

1. Возможность одновременных измерений большого числа физических величин (например, напряжений на вводах всех фаз всех обмоток); при невозможности одновременных измерений необходима возможность их согласования по времени.

2. Возможность варьирования числа точек подключения генераторного оборудования, т.е. возможность подачи воздействия на один или несколько из вводов обмотки.

3. Возможность варьирования режима включения объекта: заземление или изоляция нейтрали, изменение схемы и параметров элементов нагрузки на обмотки.

4. Возможность варьирования параметров и формы напряжения или тока генератора.

5. Возможность оперативных переключений точек генерирования и измерений с учетом больших габаритов трансформатора, протяженности измерительных присоединений, а также большого объема опытов и регистраций.

6. Помехоустойчивость определяет требования к мощности тестового воздействия и уровням генерируемых сигналов и реакции на них.

7. Контролируемость воздействий и реакции определяется возможностью дублирования параметров воздействий и регистраций без увеличения объемов и времени обследований.

8. Безопасность при работах в действующей электроустановке. Генераторно-измерительный комплекс не должен представлять опасности для оборудования подстанции (включая автоматику), а также для технического персонала.

9. Мобильность. Комплекс должен быть удобным для транспортировки и размещения на объекте, а также минимизировать затраты времени на подключение и отключение.

10. Автономность предполагает исключение негативной связи с сетью подстанции и контуром заземления или исключение влияния этой связи на результаты регистраций.

Для проведения контрольных экспериментов на первом этапе в ЦФТПЭС РАН разработан вариант генераторно-измерительного комплекса для регистрации воздействий и реакций в каналах эмиссии атмосферных перенапряжений в силовых трансформаторах.

В соответствии с задачами генераторный комплекс должен обеспечить воздействие на фазы обмоток трансформатора периодическим сигналом, а также импульсом и сигналом смешанной формы. Поэтому в генераторный блок комплекса включены генератор периодических сигналов (синусоидальной и специальной формы) ГЗ-33 и импульсный генератор с устройством формирования колебательного импульса. Достоинством ГЗ-33 является мощность сигнала и достаточно большой уровень напряжения на выходе (около 30 В). Недостаток – ограничение по частоте.

Апериодический сигнал создается генератором импульсных напряжений (ГИН) с амплитудой до 800 В. В опытах с изменением формы воздействия ГИН дополнен простейшим  $RLC$ -контуром для формирования колебаний в начале импульса (рис.1, левый блок).

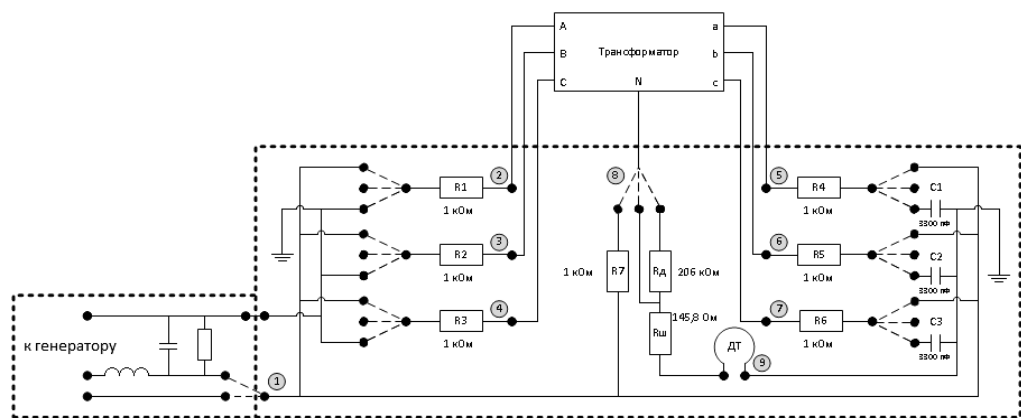


Рис.1. Схема коммутационного блока

Измерительный блок сформирован из многоканального осциллографа «Актаком» и коммутационного блока. Осциллограф позволяет выполнять регистрации одновременно по четырем независимым каналам, что позволяет выделить один или два канала для синхронизации отдельных регистраций. Частота дискретизации осциллографа достигает 100 МГц на канал в режиме реального времени. Этой величины достаточно для перекрытия частотного диапазона грозовых воздействий. В проведенных опытах в качестве опорного сигнала выбрано генерируемое напряжение на вводе трансформатора. В качестве дополнительных (контрольных) регистраций использован один из каналов измерения реакции на одной из фаз. Этот канал варьировался для увеличения числа дублирующих регистраций.

Коммутационный блок состоит из входа для подачи сигнала с генератора, семи трехпозиционных ключей для переключения подачи сигнала на нужные фазы и нейтраль трансформатора и девяти выходов для подключения измерительной аппаратуры. Схема переключений коммутационного блока показана на рис.1. Цифрами от 1 до 9 показаны выходы блока. Девятый выход представляет собой петлю провода, который пропускается через датчик тока, что позволяет контролировать напряжение и ток (при этом стоит учитывать характеристики ДТ).

В качестве источника питания использован бензогенератор с напряжением на выходе 220 В, к которому подключается источник бесперебойного питания (ИБП). Непосредственно к ИБП подключается весь измерительный комплекс.

Контрольные эксперименты на первом этапе проведены на одной из подстанций 110 кВ ОАО «Апатит». Объект обследования – силовой трансформатор ТДН-10000 110/6.0 Y/-Δ (рис.2).



Рис.2. Подготовка ГИК для обследования трансформатора ТДН-10000

Обследование выполнено в два этапа: подача периодического сигнала определенных частот и подача аperiodического (импульсного) сигнала. Оба этапа проводились для режимов замкнутой или изолированной нейтрали.

Для всестороннего исследования трансформатора на каждом этапе было проведено несколько измерений, в которых с помощью ключей изменялось направление подачи сигнала с генератора. Работы с переключениями проведены по следующей программе.

1. Подача сигнала с генератора через сопротивление 1 кОм со стороны ВН (во всех ниже приведенных случаях фазы *a*, *b* и *c* стороны НН имеют емкость на землю):

- на фазу *A*, фазы *B* и *C* изолированы;
- на фазу *A*, фазы *B* и *C* замкнуты на землю через сопротивление 1 кОм;
- на фазы *A* и *B*, фаза *C* изолирована;
- на фазы *A* и *B*, фаза *C* замкнута на землю через сопротивление 1 кОм;
- на фазы *A*, *B* и *C*.

2. Подача сигнала с генератора через сопротивление 1 кОм в нейтраль *N* (фазы *a*, *b* и *c* стороны НН также имеют емкость на землю, а фазы *A*, *B* и *C* стороны ВН замкнуты на землю через сопротивление 1 кОм).

3. Подача сигнала с генератора через сопротивление 1 кОм со стороны НН (во всех ниже приведенных случаях фазы *A*, *B* и *C* стороны ВН замкнуты на землю через сопротивление 1 кОм):

- на фазу *a*, фазы *b* и *c* имеют емкость на землю;
- на фазы *a* и *b*, фаза *c* имеет емкость на землю;
- на фазы *a*, *b* и *c*.

На первом этапе при использовании генератора периодических сигналов на трансформатор подавались сигналы частотой 1, 10, 100, 200 кГц, а также сигнал с резонансной частотой, которая определялась в ходе эксперимента с помощью измерительного оборудования.

На втором этапе использовался ГИН. На трансформатор сигнал с ГИН подавался как напрямую, так и через дополнительную *RLC*-схему, формирующую наложение колебаний на импульс напряжения. Измерения на выходах коммутационного блока проводились через омический делитель напряжения с понижающим коэффициентом 37.

Примеры осциллограмм, отражающих воздействие на различные входы трансформатора и реакции на эти воздействия, представлены на рис.3-6.

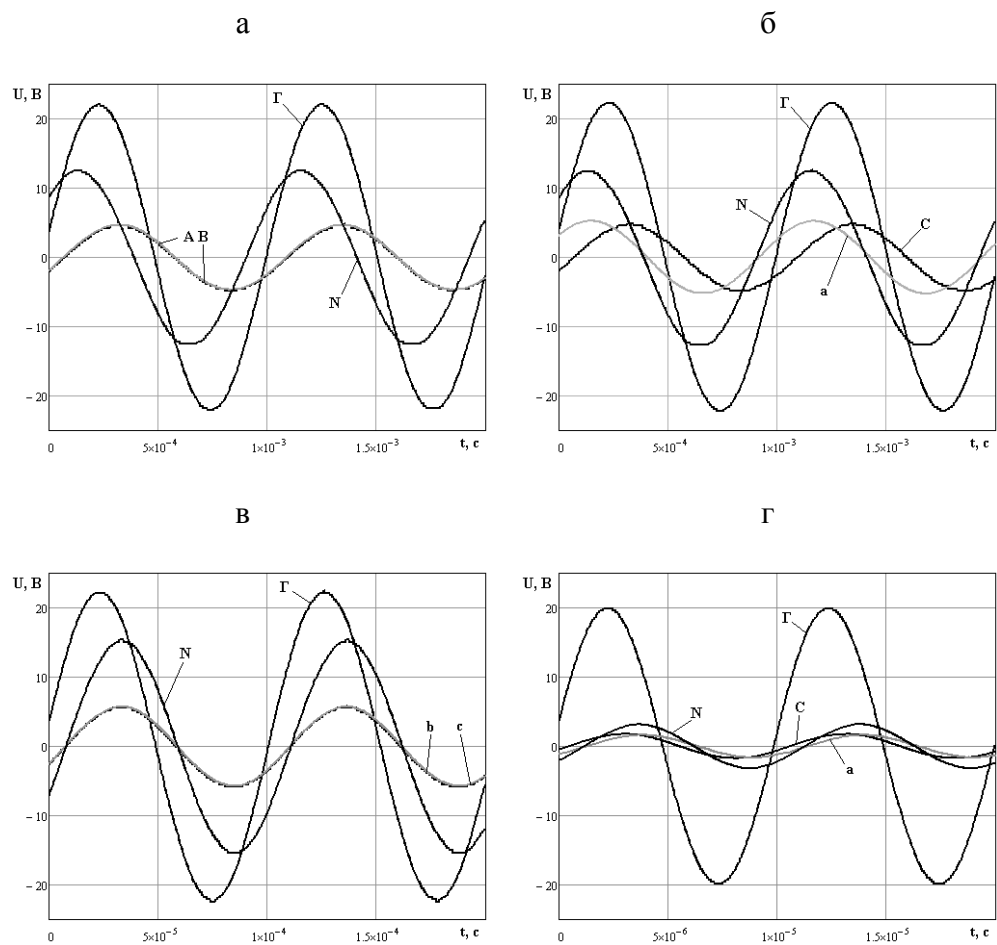


Рис.3. Осциллограммы напряжений с выхода генератора  $\Gamma$ , на вводах трансформатора со стороны ВН (A, B, C), со стороны НН (a, b, c) и в нейтрали N при подаче сигнала с генератора в нейтраль при частоте (кГц):  
a и б – 1; в – 10; г – 100

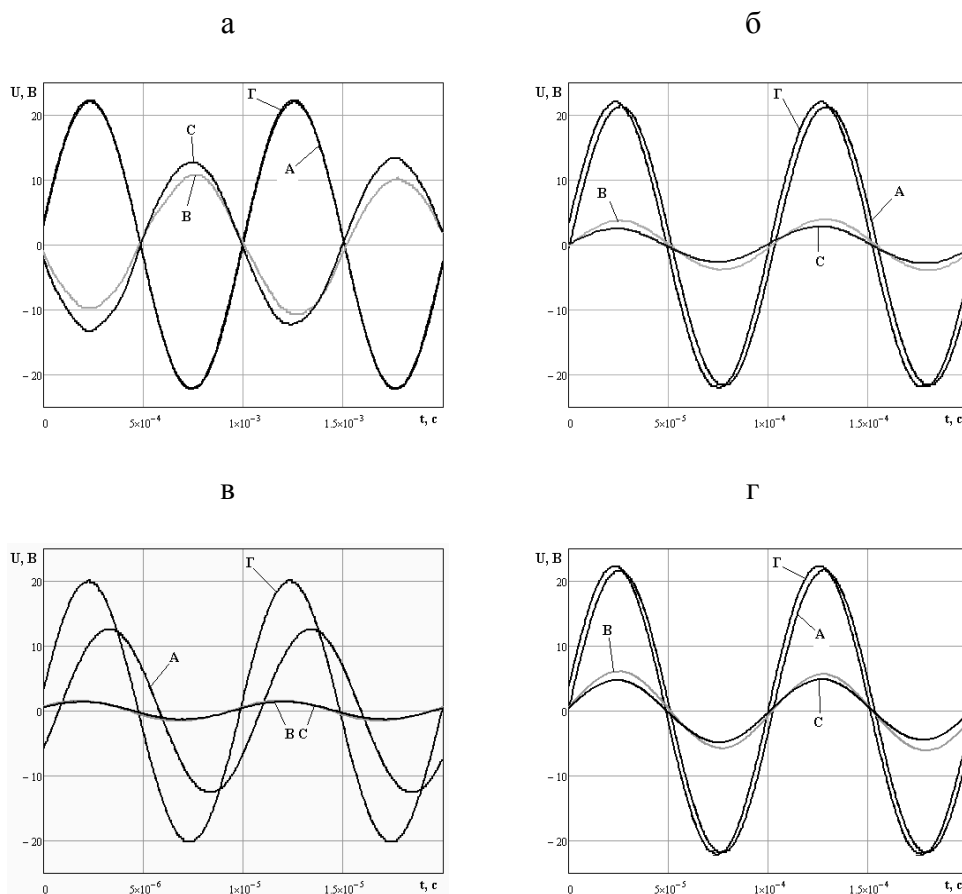


Рис.4. Осциллограммы напряжений с выхода генератора Г, на вводах трансформатора со стороны ВН (А, В, С), со стороны НН (а, б, с) и в нейтрали N при подаче сигнала с генератора на фазу А со стороны ВН в режиме замкнутой нейтрали при частоте (кГц):  
 а – 1; б – 10; в – 100; г – 10 в режиме изолированной нейтрали

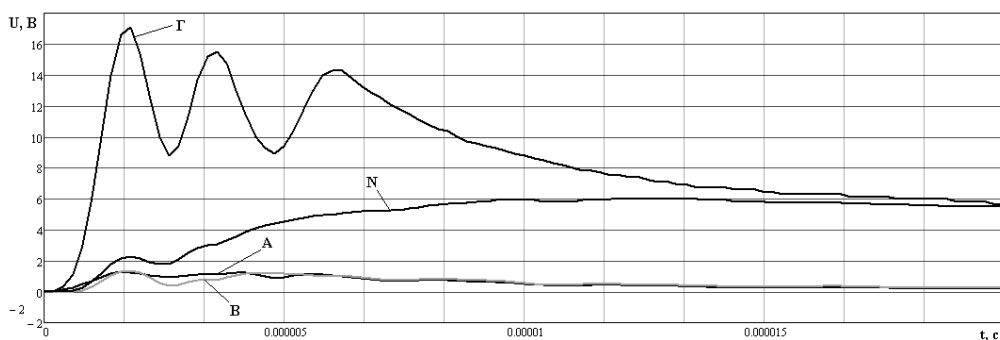


Рис.5. Осциллограммы напряжений с выхода генератора Г, на вводах трансформатора со стороны ВН (А, В) и в нейтрали N при подаче импульсного сигнала с генератора в нейтраль с использованием RLC-контура



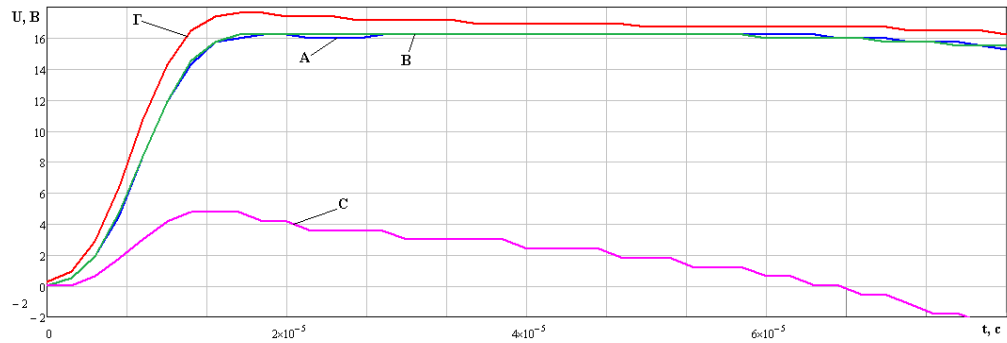


Рис.6. Осциллограммы напряжений с выхода генератора Г, на вводах трансформатора со стороны ВН (А, В, С) при подаче импульсного сигнала с генератора на фазы А и В со стороны ВН без использования RLC-контура

Всего объем регистраций составил более 5000 осциллограмм.

По результатам контрольных испытаний выявлено.

1. Частотные обследования требуют больших затрат времени и являются трудоемкими. Это определяется необходимостью поиска резонансных частот и повторенных настроек при регистрации большого числа каналов распространения сигналов. В выполненных экспериментах контролировалось 9 каналов распространения тестовых воздействий.

2. Обработка регистраций показала необходимость дополнительных опытов вблизи резонансной частоты (как в сторону уменьшения частоты, так и в сторону ее увеличения).

3. Целесообразность в области высоких частот (резонансных явлений) выполнить регистрации с наложением нескольких частот в генерируемом сигнале.

4. Необходимость увеличения возможности варьирования формы импульсных и комбинированных сигналов.

5. Формирование сигналов специальной формы с включением резонансных частот.

6. Проведение опыта с включением периодического воздействия и регистраций реакций, соответствующих переходным процессам и времени релаксации.

7. Разработка специальной методики для выявления влияний измерительных подключений достаточно большой длины.

Как видно, основные требования предъявляются на данном этапе к генераторному блоку.

## Выводы

1. Разработаны требования к генераторно-измерительному комплексу для обследования характеристик каналов эмиссии грозowych перенапряжений силовых трансформаторов.

2. Экспериментально апробирован вариант ГИК при обследовании действующего силового трансформатора 110 кВ и определены дальнейшие направления совершенствования испытательного комплекса.

## Литература

1. Калявин В.П. Надежность и диагностика электроустановок / В.П.Калявин, Л.М.Рыбаков. – Йошкар-Ола: Марийский госуниверситет, 2000. – С. 369.
2. Перенапряжения в нейтрали силовых трансформаторов 6-220 кВ и методы их ограничения / Ф.Г.Алиев, А.К.Горюнов, А.Н.Евсеев, А.И.Таджибаев, Ф.Х.Халилов. – СПб.: Изд. ПЭИПК, 2001. – С. 120.
3. Золотых А.В. Выбор ограничителей перенапряжений для защиты нейтрали силовых трансформаторов 110-220 кВ / А.В.Золотых, Ф.Х.Халилов. Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. Вып.6. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2013. – № 2 (15). – С. 76-85.
4. Проблемы и перспективы регистрации грозových перенапряжений в действующей сети / Д.И.Власко, А.О.Востриков, А.П.Домонов, Ю.М.Невретдинов // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. Вып.5. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2011. – С. 54-64.
5. Власко Д.И. Грозовые перенапряжения на изоляции нейтрали трансформаторов / Д.И.Власко, А.О.Востриков, Ю.М.Невретдинов // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. Вып.4. – Апатиты: Изд. КНЦ, 2012. – С. 38-44.

## 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,  
кандидат технических наук  
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д.21А  
эл. почта: umnev@mail.ru

УДК 621.311

**Д.И.Власко, Ю.М.Невретдинов, Г.П.Фастий**

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗМЕЩЕНИЯ ГРОЗОЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ НА ПОДСТАНЦИИ 110 КВ\***

### **Аннотация**

Приведены результаты исследований эффективности грозозащиты подстанции 110 кВ при замене вентильных разрядников на нелинейные ограничители перенапряжений. Показана опасность обратных перекрытий изоляции ЛЭП при ударах молнии в опоры и трос на подходах к подстанциям, а также возможность уменьшения длины тросовых подходов.

### **Ключевые слова:**

*грозовые перенапряжения, подстанция, грозовые волны, грозозащита, надежность.*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-00690).

## EFFICIENCY OF GROUND ARRESTERS ALLOCATION ON THE 110 KV SUBSTATION

### Abstract

Results of the research on efficiency of the 110 kV substation lightning protection by applying nonlinear overvoltage limiters instead of valve dischargers are presented. Danger of reverse insulating covers for electric power transmission during lightning strikes to supporting structure and ground wire rope as well as possibility to reduce rope length are shown.

### Keywords:

*lightning overvoltages, substation, surge waves, lightning protection, reliability.*

Проблема гроззащиты оборудования открытых распределительных устройств (ОРУ) с подключенными воздушными линиями электропередачи (ВЛ) не теряет своей актуальности, так как появляется новое оборудование, новые защитные аппараты и пересматриваются требования. Актуальность исследований грозовых перенапряжений на подстанциях и развития методов оценки эффективности молниезащиты отмечалась в докладах конференций по молниезащите [1].

Представленные исследования выполнены на примере подстанции 110 кВ с ОРУ, выполненной по схеме – два блока «линия – трансформатор» с не автоматической переключкой (рис.1). В нормальном режиме, при котором эффективность защиты снижается, блоки работают раздельно, так как отсутствует влияние второго комплекта защитных аппаратов и шунтирующее действие второй подключенной к ОРУ линии.

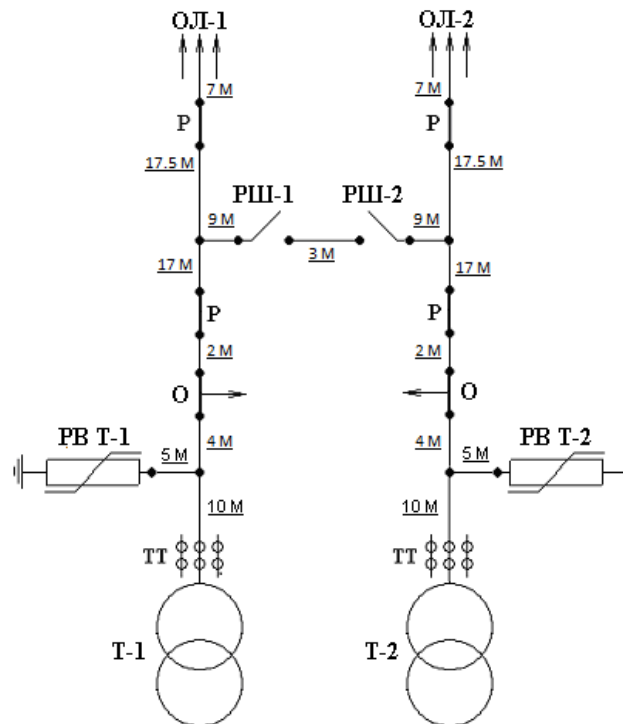


Рис.1. Принципиальная схема ОРУ 110 кВ подстанции

На схеме рис.1 даны длины ошиновок. Для коммутации трансформаторов могут быть установлены выключатели или отделители (в рассмотренном варианте).

В ОРУ 110 кВ заходят две одноцепные линии – ОЛ-1 и ОЛ-2 (отпайки длиной около 5 км каждая). Опоры металлические. Фазный провод АС-70. Изоляция проводов ВЛ выполнена изоляторами П-4.5 по 7 штук в гирлянде. На подходе линии оборудованы грозозащитным тросом ТК-50 протяженностью 2.5 км. Линии расположены вблизи друг друга, их зоны ориентации разрядов молнии частично перекрываются. Эффект взаимного экранирования линий при ударах молнии учтен при оценке показателей эффективности молниезащиты.

*Расчетные параметры ОЛ-1 и ОЛ-2 110 кВ*

- Средняя высота подвеса провода ВЛ  $h_{пр. ср.} = 19.4$  м (для верхней фазы)
- Средняя высота грозозащитного троса  $h_{тр. ср.} = 24.7$  м
- Грозозащитный угол  $\alpha = 25^\circ$
- Индуктивность опоры составляет 16.8 мкГн
- Средняя взаимная индуктивность опоры с каналом молнии 5.6 мкГн
- Расчетная вольт-секундная характеристика (ВСХ) изоляции ВЛ 110 кВ:

$$U(t) = 722.4 \sqrt{1 + \frac{1.526}{t}} \text{ [кВ]} \quad , \quad (1)$$

где  $t$  – предразрядное время.

Расстояние от портала ОРУ до опоры 1 принято равным 80 м. Средняя длина остальных пролетов ВЛ на подходе 200 м.

Защита ОРУ 110 кВ от набегающих волн атмосферных перенапряжений выполнена с помощью двух комплектов защитных аппаратов (см. рис.1), установленных вблизи вводов трансформаторов Т-1 и Т-2. Защитное расстояние при расчетах с вентильными разрядниками РВС-110 кВ составляет 15 м (по ошиновке), т.е. соответствует требованиям ПУЭ.

Расчетная модель составлена на *EMTP* в трехфазном исполнении ВЛ и ОРУ. Для оборудования рассматриваемой подстанции опасность могут представлять прорывы молнии на провода в пределах опасной зоны, а также волны с крутым фронтом, которые образуются вследствие обратных перекрытий изоляции ВЛ на подходе [2]. Поэтому расчеты выполнены для прорывов молнии на провода и для обратных перекрытий при ударах молнии в опоры и трос.

Перекрытия изоляции ВЛ моделировались на опорах (и портале) с обеих сторон от точки поражения ВЛ молнией. В расчетах варьировались характеристики защитных аппаратов, защитное расстояние до вводов Т-1 и Т-2, а также импульсные сопротивления заземлений опор ( $R_{зо}$ ). Величина  $R_{зо}$  опор на подходе ВЛ принималась 15 и 30 Ом (в соответствии с требованиями ПУЭ), а также 50 и 100 Ом (при невозможности выполнения требований ПУЭ [3]) в районах с низкой проводимостью грунта [2].

При составлении расчетной модели входные емкости оборудования приняты в соответствии с данными табл.1. Характеристики защитных аппаратов даны в табл.2.

*Таблица 1*

Входные емкости элементов ОРУ 110 кВ

Тип оборудования	Емкость, пФ
Силовые трансформаторы	1000
Разъединители	
включенные	60
отключенные	40
Отделители	120
Трансформаторы тока	340
Защитные аппараты	30
Ошиновка	6.4

## Характеристики защитных аппаратов 110 кВ

Параметр	Защитный аппарат					
	вентильный разрядник			ОПН		
Амплитуда тока 8/20 мкс, кА	3.0	5.0	10.0	5.0	10.0	20.0
Остающееся напряжение, кВ	315	335	367	258	275	296
Напряжение срабатывания, кВ	285			144*		

\* Для ОПН напряжение «условного срабатывания» – начало реагирования на грозовое воздействие.

Допустимый уровень грозовых перенапряжений на силовом трансформаторе равен 468 кВ. За базовую величину принята грозовая активность 20 ч в год. Перерасчет защитного расстояния для ОПН ( $l_{3\text{ОПН}}$ ) выполнен по ПУЭ [3]:

$$l_{3\text{ ОПН}} = l_{3\text{ РВ}} (U_{\text{ИСП}} - U_{\text{ОПН}}) / (U_{\text{ИСП}} - U_{\text{РВ}}), \quad (2)$$

где  $l_{3\text{ РВ}}$  – расстояние от РВ до защищаемого оборудования, м;  $U_{\text{ИСП}}$  – испытательное напряжение защищаемого оборудования при полном грозовом импульсе, кВ;  $U_{\text{ОПН}}$ ,  $U_{\text{РВ}}$  – остающееся напряжение на ОПН (РВ) при токе 5 кА (для  $U_{\text{НОМ}}=110\text{-}220$  кВ), кВ. В расчетах принято  $l_{3\text{ ОПН}}=17$  м.

## Результаты расчетов на модели грозозащиты подстанции 110 кВ

По результатам расчетов получены кривые опасных токов молнии (КОТМ), которые представляют опасность для силового трансформатора, для случаев ударов молнии в ВЛ (прорывы и обратные перекрытия) на разном удалении от подстанции (портала). Совокупность этих кривых дает трехмерную область опасных параметров токов молнии [4], координатой которой является расстояние до ОРУ-110 кВ ( $l_x$ ). Ввиду большого объема промежуточной информации в качестве иллюстрации приведены только показательные кривые опасных токов молнии (КОТМ) для расчетных вариантов с сопротивлением заземления опор 50 Ом: на рис.2 – для варианта защиты вентильным разрядником РВС 110 кВ и на рис.3 – для варианта защиты ОПН 110 кВ.

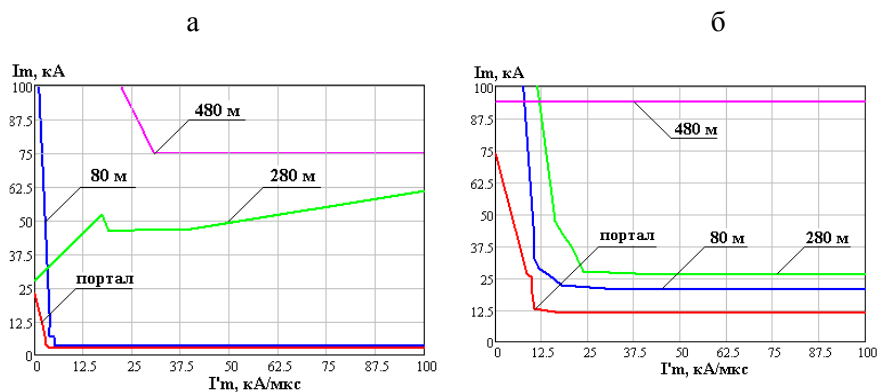


Рис.2. Кривые опасных параметров токов молнии (КОТМ) при ударах молнии в подход ВЛ вблизи портала на расстоянии 80, 280 и 480 м. Защита ОРУ выполнена с помощью РВС 110 кВ:

а – прорывы молнии на провода; б – обратные перекрытия

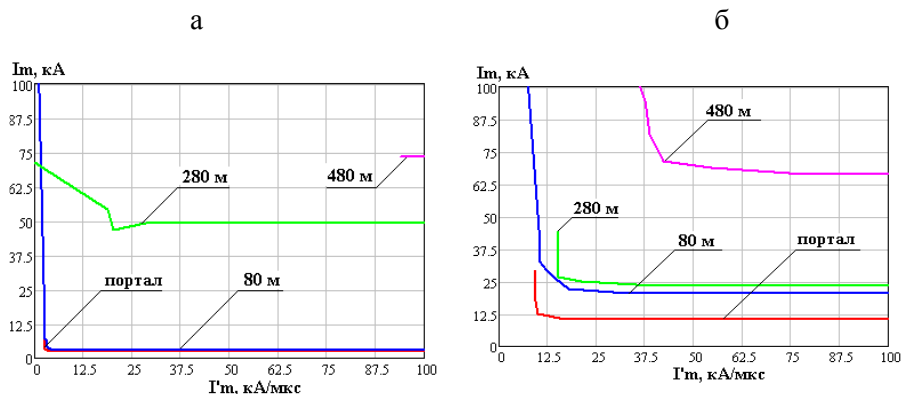


Рис.3. Кривые опасных параметров токов молнии (КОТМ) при ударах молнии в подход ВЛ вблизи портала, на расстоянии 80, 280 и 480 м. Защита ОРУ выполнена с помощью ОПН 110 кВ:  
 а – прорывы молнии на провода; б – обратные перекрытия

В вариантах защиты ОРУ с помощью ОПН-110 кВ защитное расстояние до Т-1 и Т-2 принято 17 м.

Как видно из рис.2 и 3, КОТМ для прорывов молнии располагаются в основном ниже соответствующих КОТМ для обратных перекрытий. Исключением являются КОТМ для ударов молнии в ВЛ на удалении 280 м. В этих случаях КОТМ пересекаются при амплитуде тока молнии 50 кА и крутизне около 15 кА/мкс. При дальнейшем увеличении крутизны тока молнии вероятность  $P(I_m, I'_m)$  для обратных перекрытий больше, чем при прорывах молнии на провода ВЛ.

Интегральные вероятности опасных параметров токов молнии  $P_{пр}(I_m, I'_m)$  и  $P_{обр}(I_m, I'_m)$ , рассчитанные по КОТМ для разных значений сопротивлений заземлений опор на подходе, приведены на рис.4 и 5 соответственно для защит с РВС-110 кВ или с ОПН-110 кВ.

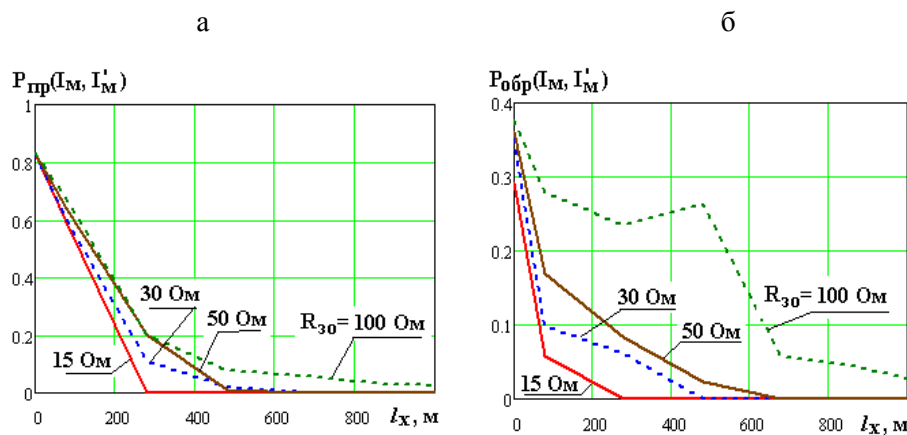


Рис.4. Зависимости вероятности разрядов молнии с опасными параметрами тока от удаления точки удара молнии от портала ОРУ при различных значениях сопротивлений заземлений опор на подходе. Защита ОРУ выполнена с помощью РВС 110 кВ:  
 а – прорывы молнии на провода; б – обратные перекрытия

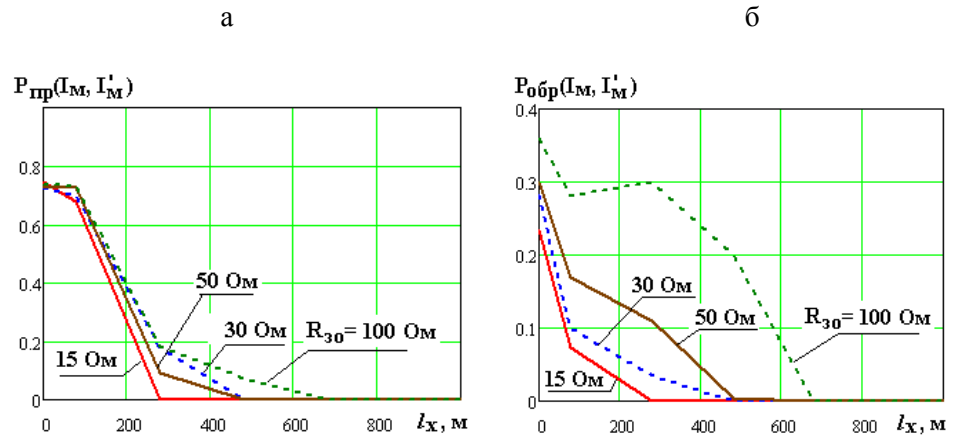


Рис.5. Зависимости вероятности разрядов молнии с опасными параметрами тока от удаления точки удара молнии от портала ОРУ при различных значениях сопротивлений заземлений опор на подходе. Защита ОРУ выполнена с помощью ОПН 110 кВ:  
 а – прорывы молнии на провода; б – обратные перекрытия при ударах молнии в опоры и трос

Из сопоставления зависимостей на рис.4а и б, а также рис.5а и б следует, что значения вероятности разрядов молнии с опасными параметрами тока зависят от величины  $R_{30}$  в большей степени для случаев обратных перекрытий изоляции, что особенно проявляется при разрядах на удалении от 300 до 700 м. Это объясняется тем, что при обратных перекрытиях на проводах ВЛ образуются волны с большой крутизной фронта.

Приведенные оценки позволяют сопоставить между собой данные относительно каждого из рассматриваемых случаев появления опасных перенапряжений – прорывы молнии на провода или обратные перекрытия. Однако для сопоставления этих расчетных случаев между собой целесообразно использовать показатель степени опасности ударов молнии, учитывающий вероятность возникновения расчетного случая при ударе молнии в ВЛ [5, 6]. Таким образом, для степени опасности ударов молнии с последующим прорывом на провод ВЛ ( $S_{пр}$ ) и степени опасности ударов молнии с последующим обратным перекрытием ( $S_{обр}$ ) получаем:

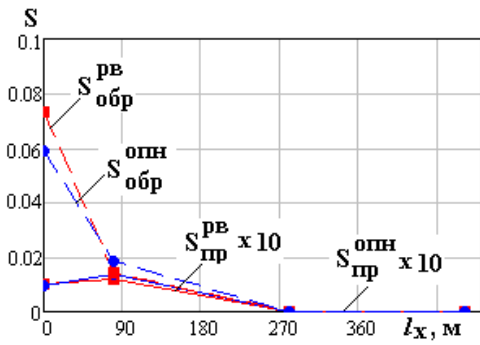
$$S_{пр} = P_{пр} P_{пр}(I_M, I'_M), S_{обр} = P_{обр}(I_M, I'_M), \quad (3)$$

где  $P_{пр}$  – вероятность прорыва молнии на провод через тросовую защиту.

Здесь учитываем, что  $P_{обр}(I_M, I'_M)$  определяет вероятность таких токов молнии, при которых происходят обратное перекрытие с опоры на провод и образование опасных перенапряжений на оборудовании (Т-1 или Т-2).

Сопоставление показателей степени опасности для ударов молнии в подход ВЛ  $S_{пр}$  и  $S_{обр}$  для вариантов защиты вентильными разрядниками и ОПН при различных значениях сопротивлений заземлений опор на подходе дано на рис.6 и 7. Так как вероятность прорыва молнии на провода существенно снижает опасность этих ударов молнии (3), для наглядности сопоставлений значения опасности для прорывов молнии  $S_{пр}$  умножена на 10.

а



б

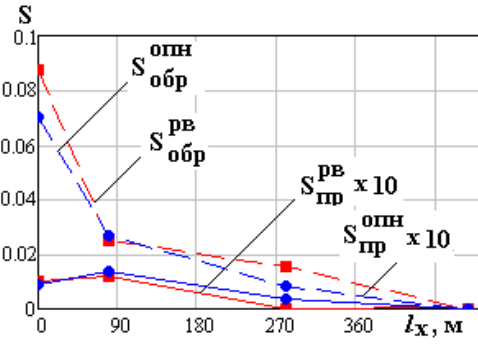
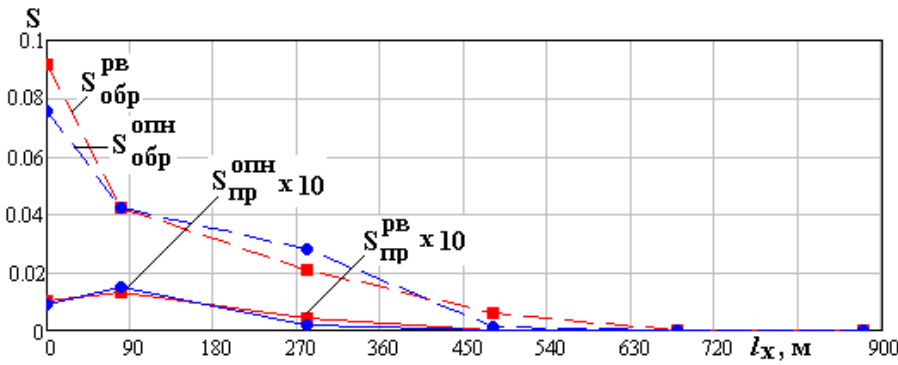


Рис.6. Сопоставление опасности ударов молнии в подход ВЛ на различном удалении от ОРУ ( $l_x$ ) для вариантов защиты ОРУ с помощью РВС-110 ( $S^{PB}$ ) или ОПН-110 ( $S^{OПH}$ ). Сопротивление заземления опор на подходе:  
а –  $R_{30}=15$  Ом; б –  $R_{30}=30$  Ом

а



б

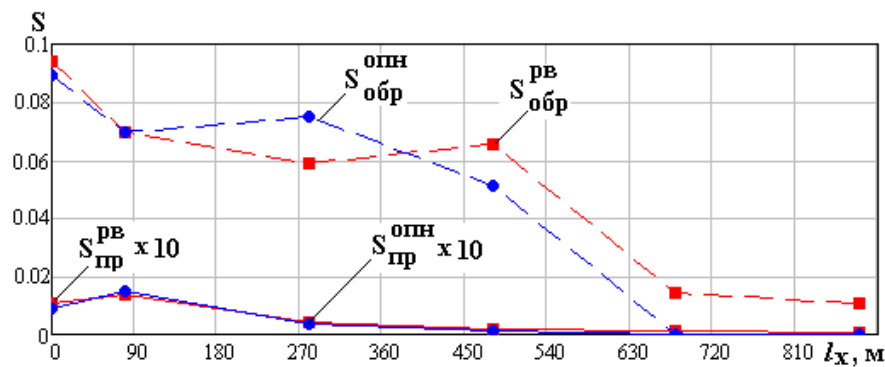


Рис.7. Сопоставление опасности ударов молнии в подход ВЛ на различном удалении от ОРУ ( $l_x$ ) для вариантов защиты ОРУ с помощью РВС-110 ( $S^{PB}$ ) или ОПН-110 ( $S^{OПH}$ ). Сопротивление заземления опор на подходе:  
а – 50 Ом; б – 100 Ом



Из сопоставления показателей опасности разрядов молнии (рис.6 и 7) видно следующее:

- при  $R_{30}=15$  Ом (соблюдение требований ПУЭ) опасность могут представлять разряды молнии в ВЛ в пределах 2 пролетов, а степень опасности ударов молнии в опору 1 и далее не превышает 0.02;
- при  $R_{30}=30$  Ом длина опасной зоны увеличивается до 0.5 км и опасность разрядов молнии незначительно увеличивается;
- при  $R_{30}=50$  Ом длина опасной зоны увеличивается до 0.7 км; одновременно увеличивается опасность ударов молнии в заземленные конструкции примерно в 2 раза (в сравнении с вариантами при  $R_{30}=15$  Ом);
- при  $R_{30}=100$  Ом увеличение длины опасной зоны отмечается для защиты с РВС-110 кВ до 1 км; опасность разрядов молнии в опоры и тросы заметно увеличивается – на удалении от 0.09 до 0.5 км примерно до 0.08;
- основную опасность представляют разряды в опоры и трос; особенно это проявляется при  $R_{30}=30$  Ом и более;
- показатели степени опасности разрядов молнии в подход ВЛ при применении в ОРУ 110 кВ РВС-110 и ОПН-110 примерно одинаковы. Заметное различие степени опасности ударов молнии при применении РВС-110 или ОПН-110 отмечается при сопротивлении  $R_{30}=100$  Ом для разрядов в трос или опоры на удалении  $l_x$  более 100 м, т.е. во второй пролет и далее. При этом защита с ОПН более эффективна (за исключением случаев ударов молнии в опору 2 или в трос вблизи нее). Из рис.6 и 7 следует, что длина тросового подхода может быть уменьшена до 1 км. При замене РВС-110 на ОПН-110 длина подхода может быть уменьшена до 0.7 км.

Расчеты вероятного числа опасных перенапряжений ( $N$ ) на изоляции силового трансформатора Т-1 получены для разных значений  $R_{30}$  по значениям опасности ударов молнии, в том числе приведенных на рис.6 и 7. Результаты расчетов сведены и представлены на рис.8 и 9 в виде зависимостей расчетного числа опасных перенапряжений на силовом трансформаторе ( $N$ ) (рис.8 и 9) и числа лет, в течение которых на изоляции трансформатора возникнет хотя бы одно опасное грозовое перенапряжение ( $T$ ) (рис.9), от величины импульсного сопротивления заземления опор ВЛ на подходах. Соответственно, полученные показатели приведены для варианта защиты вентильным разрядником ( $N_{РВ}$  и  $T_{РВ}$ ) ( $l_3=15$  м) и при замене РВС-110 на ОПН-110 ( $N_{ОПН}$  и  $T_{ОПН}$ ).

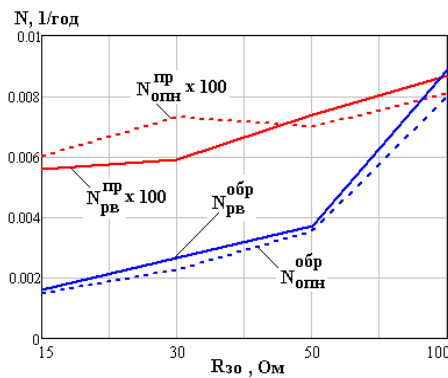


Рис.8. Зависимости расчетного числа опасных для трансформатора Т-1 перенапряжений от импульсного сопротивления заземления опор  $R_{30}$  при применении РВ и ОПН

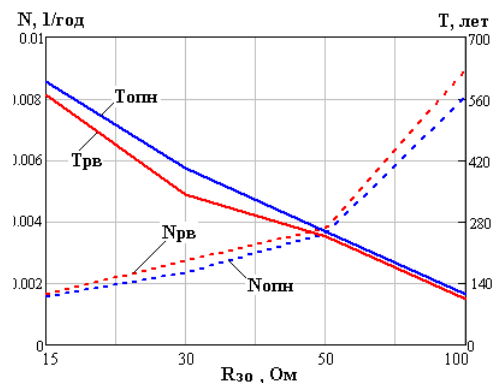


Рис.9. Зависимости показателей надежности грозозащиты трансформатора Т-1 от величины импульсного сопротивления заземления опор  $R_{30}$

Для иллюстрации влияния расчетных случаев возникновения перенапряжений на рис.8 дано разделение вероятного числа опасных перенапряжений на составляющие для прорывов молнии на провода ( $N^{IP}$ ) и для разрядов молнии в опоры и трос с обратными перекрытиями на провода ( $N^{OBP}$ ). Так как значения  $N^{OBP}$  значительно превышают  $N^{IP}$ , на рис.8 для наглядного представления расчетное число опасных перенапряжений от прорывов молнии на провода умножены на 100.

Как видно из данных рис.8, даже при относительно низкой величине сопротивления заземления опор обратные перекрытия могут существенно влиять на эффективность защиты от набегающих грозовых волн.

Из приведенных на рис.8 результатов расчетов видно, что применение ОПН может влиять на некоторое увеличение числа опасных перенапряжений, что может объясняться увеличением добротности контура с низким динамическим сопротивлением резисторов ОПН.

Таким образом, силовой трансформатор Т-1 ОРУ-110 кВ имеет более эффективную защиту от набегающих по линиям грозовых волн при применении в качестве защитного аппарата ОПН.

Из приведенных на рис.9 показателей видно, что применение ОПН при импульсных сопротивлениях заземления опор, соответствующих требованиям ПУЭ [3], а именно 15 и 30 Ом, более целесообразно, чем применение РВ. При сопротивлениях  $R_{зп}$ , не соответствующих требованиям ПУЭ, а именно 50 и 100 Ом (более характерных для грунтовых условий Кольского полуострова [2]), показатели надежности при применении как РВ, так и ОПН значительно снижаются. Однако даже в этом случае наблюдается некоторое преимущество ОПН.

## Выводы

1. В районах с низкой проводимостью грунта фактором, определяющим эффективность защиты от грозовых волн, являются обратные перекрытия изоляции ВЛ на подходе при ударах молнии в опоры или трос.

2. Применение в схемах тупиковых подстанций 110 кВ, функционирующих в нормальном режиме работы, замены вентильных разрядников РВС-110 на ОПН-110 повышает эффективность грозозащиты, что особенно проявляется при сопротивлениях заземления опор до 50 Ом и более.

3. По результатам выполненных расчетов длина защищенного тросом подхода ВЛ 110 кВ к тупиковым подстанциям может быть уменьшена до 1 км при защите трансформаторов вентильным разрядником, установленным на расстоянии до 15 м от трансформатора. При замене РВС-110 на ОПН-110 длина тросового подхода может быть уменьшена до 0.7 км. Дальнейшее увеличение длины тросового подхода не влияет на эффективность защиты от грозовых волн, набегающих по ВЛ.

## Литература

1. Базелян Э.М. Третья Российская конференция по молниезащите. Проблемы, исследования, перспективы / Э.М.Базелян // Новости электротехники. – 2012. – № 3(75).
2. Костенко М.В. Грозозащита электрических сетей в районах с высоким удельным сопротивлением грунта / М.В.Костенко, Ю.М.Невретдинов, Ф.Х.Халилов. – Л.: Изд-во «Наука» ЛО, 1984. – 112 с.
3. Правила устройства электроустановок / Госэнергонадзор. – 7-е изд. – СПб.: ДЕАН, 2008. – 704 с.
4. Анализ надежности грозозащиты подстанций / М.В.Костенко, Б.В.Ефимов, И.М.Зархи, Н.И.Гумерова; под ред. И.Р.Степанова. – Л.: Наука, 1981.

5. Невретдинов Ю.М. Исследование защиты подстанции 150 кВ от грозových волн с учетом реальных заземлителей опор ЛЭП на подходах / Ю.М.Невретдинов, Д.И.Власко // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. Вып.2. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2011. – № 1. – С. 78-89.
6. Развитие методов анализа эффективности грозозащиты подстанций / Д.И.Власко, А.П.Домонов, Б.В.Ефимов, Ю.М.Невретдинов // Электрические станции. – 2013. – № 3. – С. 45-51.

#### **Сведения об авторах**

##### **Власко Денис Игоревич**

инженер филиала ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Кольская атомная станция  
Россия, 184230, Мурманская область, г.Полярные зори  
эл. почта: den-energy@yandex.ru

##### **Невретдинов Юрий Масумович**

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

##### **Фастий Галина Прохоровна**

научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии  
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦРАН  
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д.21А  
эл. почта: fastiy@ien.kolasc.net.ru

УДК 621.315.17

#### **В.В.Ярошевич, Ю.М.Невретдинов**

### **ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 35, 110 И 150 КВ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА\***

#### **Аннотация**

Приведены результаты анализа опыта эксплуатации, нарушений, отказов и аварий в высоковольтных сетях, расположенных на Кольском полуострове. Показана специфика региона. Получены удельные показатели отключений, оценки показателей надежности ВЛ 35, 110 и 150 кВ, а также показатели успешности работы АПВ.

#### **Ключевые слова:**

*грозоупорность, опыт эксплуатации, грозовая деятельность, двухцепная линия, параметр потока отказов.*

#### **V.V.Yaroshevich, Y.M.Nevretdinov**

### **RELIABILITY INDICATORS ASSESSMENT OF THE 35, 110 AND 150 KV AIR POWER LINES UNDER CONDITIONS OF THE KOLA PENINSULA NORTH**

#### **Abstract**

Results of the analysis of operating experience, faults and breakdowns of high-voltage networks located on the Kola Peninsula are presented. Regional specificity is shown. Specific indicators of shutdowns 35, 110 and 150 kV air power lines reliability indicator assessment as well as indicators of autorecloser work efficiency have been identified.

#### **Keywords:**

*lightning-surge proofing, operating experience, storm activity, two-chain line, fault stream indicator.*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-00690).

Обеспечение надежности и безопасности энергоснабжения зависит непосредственно от условий эксплуатации электрооборудования, его защищенности от опасных электромагнитных воздействий. Это определяет актуальность прогнозирования перенапряжений, в том числе возникающих в результате развития нарушений в электрической сети. Рекомендованные показатели надежности для воздушных линий (ВЛ) по оценкам разных источников [1-3] могут существенно отличаться. Для примера, в табл.1 и 2 сопоставляются средние параметры потока отказов и время восстановления ВЛ.

Таблица 1

Средний параметр потока отказов

$U_{ном}$ , кВ	Число цепей	УМП [2]	РД 34.20.574 [1]	ОРГРЭС [3]
35	Одноцепная	0.63÷0.65	0.72÷0.9	2
	Двухцепная (отказ одной цепи)	0.72÷0.76	0.81÷1.06	1.6
	Двухцепная (отказ двух цепей)	0.05÷0.16	0.05÷0.22	0.4
110	Одноцепная	0.53÷1.05	0.66÷1.28	3.9
	Двухцепная (отказ одной цепи)	0.81÷1.16	1.01÷1.68	3.9
	Двухцепная (отказ двух цепей)	0.1÷0.12	0.13÷0.17	0.9
220 (150)	Одноцепная	0.26÷0.4	0.36÷0.50	1.7
	Двухцепная (отказ одной цепи)	0.28÷0.43	0.47÷0.63	2
	Двухцепная (отказ двух цепей)	0.03	0.03÷0.04	0.4
330	Одноцепная	0.3÷0.48	0.55	1.3
	Двухцепная (отказ одной цепи)	0.79	0.90	3.8
	Двухцепная (отказ двух цепей)	-	0.09	0.4

Таблица 2

Среднее время восстановления  $T_{в}$ , ч

$U_{ном}$ , кВ	Число цепей	УМП [2]	РД 34.20.574 [1]	ОРГРЭС [3]
35	Одноцепная	9.0÷10.0	9.0÷10.0	15.8
	Двухцепная (отказ одной цепи)	6.0÷9.5	6.0÷9.5	10.5
	Двухцепная (отказ двух цепей)	8.0	8.0÷12.4	14.0
110	Одноцепная	8.8÷11.0	8.8÷11.0	13.1
	Двухцепная (отказ одной цепи)	6.9÷8.4	6.9÷8.4	8.8
	Двухцепная (отказ двух цепей)	10.3÷14.8	10.3÷14.8	13.1
220 (150)	Одноцепная	9.3÷14.3	9.3÷14.3	14.0
	Двухцепная (отказ одной цепи)	11.2	8.6÷11.2	10.5
	Двухцепная (отказ двух цепей)	14.9	7.6÷14.9	16.6
330	Одноцепная	10.8÷15.3	10.8	13.1
	Двухцепная (отказ одной цепи)	9.4	9.4	11.4
	Двухцепная (отказ двух цепей)	-	4.9	5.3

Как видно, оценки источников [1, 2] совпадают для показателей практически всех ВЛ разного исполнения. В значительной степени оценки по [1, 2] совпадают для параметров потока отказа. Однако оценки ОРГЭС [3] отличаются по ряду позиций в 2 и более раз.

Поэтому получение достоверных показателей непосредственно по данным эксплуатации представляет интерес не только при проектировании или реконструкции сети, но и для оценки надежности их работы, а также рисков для потребителей.

Актуальной эта задача является для регионов, имеющих специфические особенности, в том числе грунтовые, климатические и рельефные условия. К таким районам относится Кольский п-ов.

### Характеристика сети 35, 110, 150 кВ Кольского полуострова

Общая протяженность высоковольтных сетей составляет 6683 км, в том числе протяженность линий 35-330 кВ – 6178 км и 505 км – класса 10-6-0.4 кВ. Структура сети определена расположением генерирующих мощностей (18 гидроэлектростанций, две теплоэлектростанции, Апатитская и Мурманская, и атомная электростанция Кольская АЭС) и расположением потребителей (рис.1).

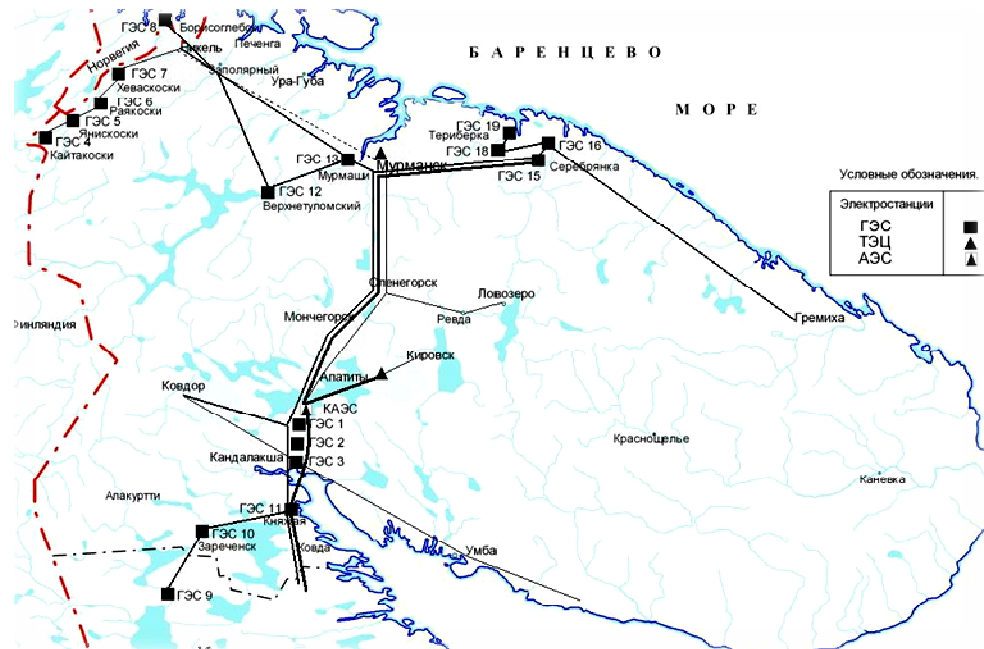


Рис.1. Расположение высоковольтной сети Мурманской обл.

На Кольском п-ове эксплуатируются линии 35, 110, 150 и 330 кВ, построенные в 1940-х гг. Наглядная интерпретация классификации линий по срокам эксплуатации приведена на рис.2. Как видно, около 70% линий имеют срок эксплуатации более 30 лет.

Трассы воздушных линий проходят по территории, обладающей рядом неблагоприятных с точки зрения надежности электроснабжения и сохранения технических характеристик конструктивных элементов воздушных линий (опор, проводов, тросов и гирлянд изоляторов), природно-климатических условий, а именно: большим количеством дней с сильными и штормовыми ветрами, туманами, снегопадами и гололедообразованием в различных формах.

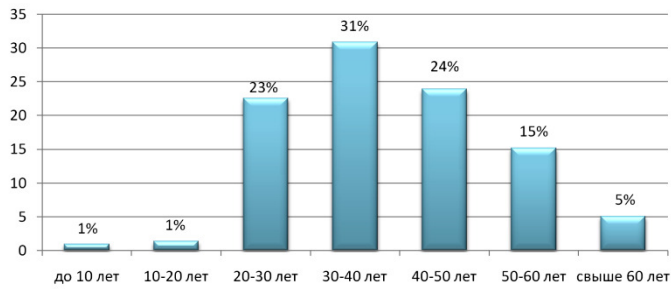
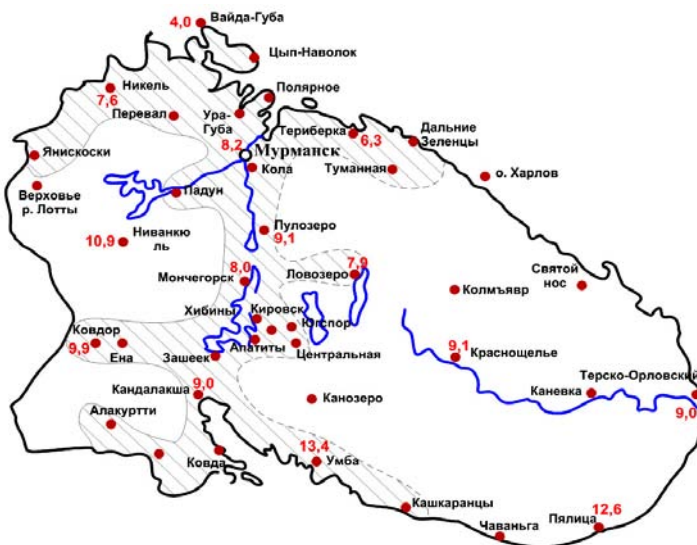


Рис.2. Сроки эксплуатации ВЛ

Для территории всего Кольского п-ова характерна низкая интенсивность грозовой деятельности (не более 20 грозовых часов в год) и высокое электрическое сопротивление грунтов (более 1000 Ом-м), при которых предусмотрены отклонения от общих требований в части защиты ВЛ тросами и характеристик заземлений опор.

В соответствии с рекомендациями ПУЭ большинство ВЛ Мурманской обл. имеют трос только на подходах к конечным и отпаечным подстанциям. Но среди ВЛ каждого класса номинального напряжения есть достаточно протяженные линии, защищенные тросом по всей длине, что позволяет оценить эффективность тросовой защиты в условиях низкопроводящих грунтов. Общая защищенность ВЛ тросом по классам номинального напряжения составляет (%): 35 кВ – 32.7, 110 кВ – 18.7, 150 кВ – 17.3, 330 кВ – 68.3.

Ввиду небольшого объема информации по магистральным сетям 330 кВ, что объясняется реструктуризацией объектов электроэнергетики, разделением права собственности и незаинтересованностью собственников генерирующих объектов и магистральной сети, детальный анализ эксплуатационных характеристик рассмотрен на примере сети 35-150 кВ северной части Мурманской области. Классификация автоматических отключений ВЛ по всем причинам проводилась с привлечением метеоданных, регистрируемых ближайшими к трассе ГМС (рис.3).



7.6● Никель – среднееголетнее число грозовых часов по ГМС «Никель»;  
 - - - - - условная граница расположения ВЛ

Рис.3. Сеть гидрометеостанций на территории Мурманской обл.

Другой особенностью региона является значительная неравномерность грозовой деятельности. Классификация отключений по причине «гроза» проводилась

с использованием сведений о начале и конце гроз по данным ГМС, полученным от ГУ «Мурманское УГМС». На наличие грозы в момент отключения проверялись все отключения, имевшие место в грозосезон, т.е. в период с мая по сентябрь.

Общие основные эксплуатационные показатели ВЛ 35, 110, 150 кВ севера Мурманской обл. за 5-летний период (2006-2010 гг.) даны в табл.3.

Таблица 3

Эксплуатационные показатели ВЛ 35, 110, 150 кВ

Эксплуатационные показатели	150 кВ	110 кВ	35 кВ
Число ВЛ	69	30	108
Общая протяженность ВЛ, км	1781.80	447.60	710.64
Защищенность тросом, %	31.4	17.4	28.6
Объем опыта эксплуатации, км-лет	8909	2238	3553
Общее число отключений из-за к.з. на ВЛ и из-за ПС	281 (100%)	89 (100%)	46 (100%)
Число отключений из-за к.з. на ВЛ			
общее	257	76	31
грозовых [%]	62 [24.1]	7 [9.2]	7 [16.1]
Число и доля [%] отключений из-за ПС	24 [8.5]	13 [14.6]	15 [32.6]
Число и доля [%] отключений по неизвестным причинам	54 [21.0]	25 [32.9]	3 [9.7]
Удельное число отключений (на 100 км в год)			
общее	2.9	3.4	0.87
в том числе грозовых	0.70	0.31	0.20
Коэффициент успешности АПВ при отключениях			
из-за к.з. на ВЛ и ПС	0.76	0.80	0.43
из-за к.з. на ВЛ	0.80	0.84	0.52
по грозовым	0.97	1.0	1.0

Как видно, удельное число отключений ВЛ существенно отличается от соответствующих значений по данным [1-3] (табл. 1), особенно для ВЛ 35 кВ.

Для протяженных элементов энергосистемы наиболее объективной информацией о нарушениях в сети являются данные об отключениях. Сопоставление динамики удельной повреждаемости линий с интенсивностью грозовой деятельности приведено на рис.4 (по данным отчетов о грозовой деятельности Кольской энергосистемы [4]).

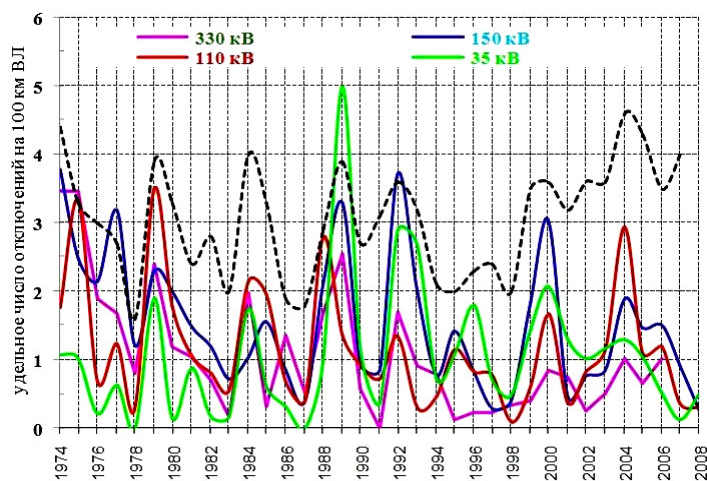


Рис.4. Совмещенный график удельных отключений ЛЭП и интенсивности грозовых сезонов

Наблюдается связь отключений воздушных линий с максимумами грозовой интенсивности (в соответствии с рис.4). Однако в периоды 1980-1985, 1996-1998, 2001-2006 гг. для разных классов напряжения по-разному.

На рисунке 5 дано распределение удельных отключений от интенсивности грозовых сезонов для разных классов напряжения (330 кВ – рис.5а, 150 кВ – рис.5б, 110 кВ – рис.5в, 35 кВ – рис.5г). Как видно из рисунков, зависимость все-таки наблюдается для линий 110 и 35 кВ хотя и с большими разбросами, но явной корреляции нет.

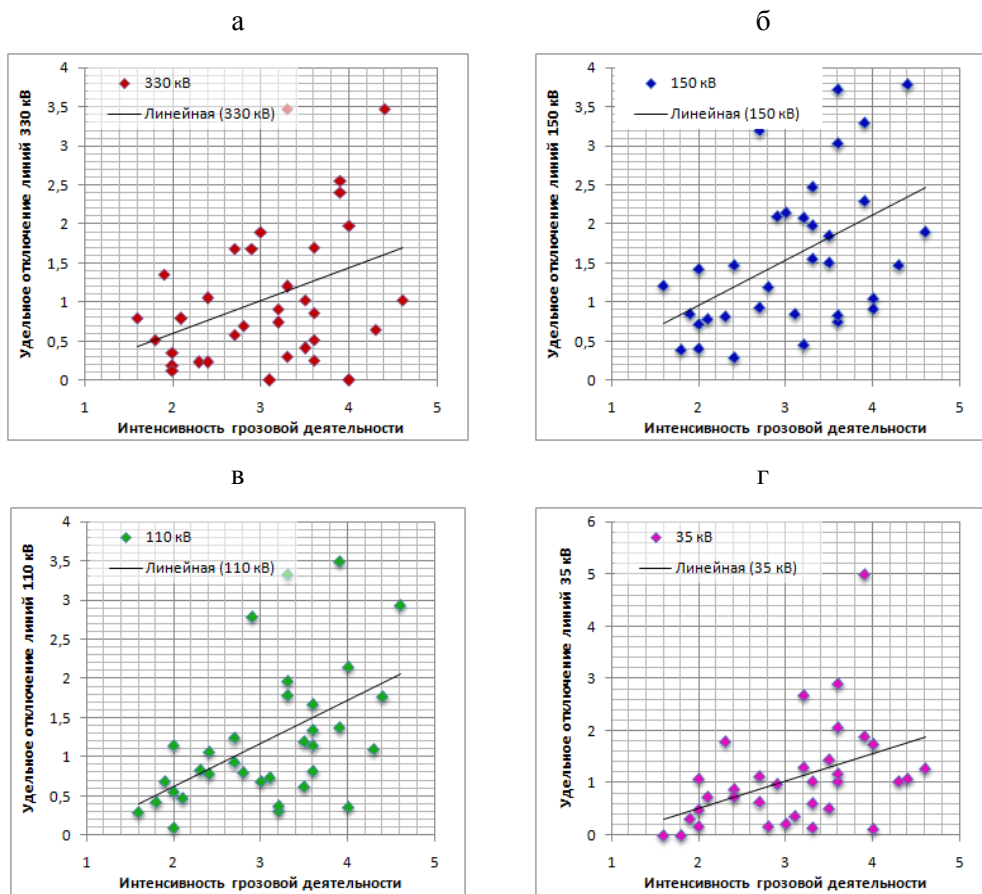


Рис.5. Распределение удельных отключений ЛЭП и интенсивности грозовых сезонов

По данным об отключениях линий 35-330 кВ за более чем тридцатилетний период среднее удельное число отключений на 100 км длины в год составило: для ВЛ 330 кВ – 1.08, 150 кВ – 1.55, 110 кВ – 1.19, 35 кВ – 1.07, что соответствует отключениям в средней полосе.

Проведем анализ надежности воздушных линий на примере сети 35-330 кВ центральной и южной частей Мурманской обл.

В основе методики сбора информации положен принцип использования первоисточников, которыми являются оперативные журналы диспетчерской службы. Анализ эксплуатационного состояния воздушных линий 35, 110, 150, 330 кВ произведен за период с 04.01.1980 по 16.01.1998 гг., т.е. за восемнадцать лет эксплуатации. Рассмотрим помесичные распределения отключений воздушных линий (табл.4). При оценке эффективности грозозащиты ВЛ используется показатель вероятности неуспешной работы АПВ. Обработка данных эксплуатации приведена в табл.4.

Таблица 4

Данные об автоматических отключениях линий ЦЭС; всего/в том числе с неуспешным АПВ



Год	Месяц												Σ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1980	$\frac{2}{-}$	$\frac{4}{-}$	$\frac{1}{-}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{6}{1}$	$\frac{40}{8}$	$\frac{11}{5}$	$\frac{26}{21}$	-	$\frac{1}{-}$	$\frac{6}{1}$	$\frac{3}{-}$	$\frac{108}{41}$
1981	$\frac{15}{5}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{1}{1}$	-	$\frac{7}{-}$	$\frac{9}{1}$	$\frac{24}{8}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{6}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{4}{-}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{81}{22}$
1982	$\frac{11}{2}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{11}{2}$	$\frac{8}{3}$	$\frac{8}{-}$	$\frac{18}{-}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{-}$	$\frac{1}{-}$	$\frac{86}{22}$
1986	$\frac{8}{3}$	$\frac{16}{12}$	$\frac{1}{-}$	$\frac{8}{2}$	$\frac{25}{10}$	$\frac{4}{1}$	$\frac{19}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{7}{1}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{8}{2}$	$\frac{14}{5}$	$\frac{118}{40}$
1984	$\frac{9}{3}$	$\frac{7}{5}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{4}{1}$	$\frac{8}{1}$	$\frac{17}{5}$	$\frac{49}{4}$	$\frac{18}{4}$	$\frac{4}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{130}{33}$
1985	$\frac{2}{1}$	$\frac{9}{3}$	$\frac{5}{2}$	-	$\frac{6}{3}$	$\frac{38}{6}$	$\frac{11}{3}$	$\frac{19}{3}$	$\frac{7}{5}$	$\frac{46}{16}$	$\frac{4}{-}$	$\frac{11}{4}$	$\frac{158}{46}$
1986	$\frac{20}{1}$	$\frac{5}{1}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{4}{1}$	$\frac{12}{4}$	$\frac{36}{7}$	$\frac{16}{9}$	$\frac{8}{1}$	$\frac{5}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{1}{-}$	$\frac{118}{29}$
1987	$\frac{6}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{9}{4}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{45}{27}$	$\frac{4}{-}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{5}{-}$	$\frac{4}{2}$	$\frac{14}{7}$	$\frac{102}{51}$
1988	$\frac{4}{1}$	$\frac{2}{-}$	$\frac{7}{1}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{11}{7}$	$\frac{48}{4}$	$\frac{63}{10}$	$\frac{11}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{35}{14}$	$\frac{5}{1}$	$\frac{8}{4}$	$\frac{203}{47}$
1989	$\frac{4}{3}$	$\frac{13}{-}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{9}{1}$	$\frac{7}{1}$	$\frac{35}{12}$	$\frac{75}{7}$	$\frac{15}{3}$	$\frac{2}{-}$	$\frac{6}{2}$	$\frac{4}{-}$	$\frac{12}{2}$	$\frac{184}{33}$
1990	$\frac{1}{-}$	$\frac{6}{2}$	$\frac{1}{-}$	$\frac{6}{3}$	$\frac{5}{1}$	$\frac{6}{-}$	$\frac{22}{4}$	$\frac{4}{-}$	$\frac{4}{-}$	$\frac{4}{1}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{65}{15}$
1991	$\frac{5}{3}$	-	$\frac{3}{1}$	$\frac{2}{1}$	-	$\frac{9}{1}$	$\frac{18}{-}$	$\frac{2}{-}$	$\frac{6}{6}$	$\frac{1}{-}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{51}{16}$
1992	$\frac{22}{8}$	$\frac{6}{1}$	$\frac{7}{3}$	$\frac{19}{12}$	$\frac{29}{6}$	$\frac{19}{5}$	$\frac{49}{15}$	$\frac{70}{9}$	$\frac{7}{1}$	$\frac{5}{-}$	$\frac{6}{-}$	$\frac{18}{3}$	$\frac{257}{63}$
1993	$\frac{22}{7}$	$\frac{31}{16}$	$\frac{12}{3}$	$\frac{24}{7}$	$\frac{3}{-}$	$\frac{10}{2}$	$\frac{44}{7}$	$\frac{3}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{20}{9}$	$\frac{8}{3}$	$\frac{9}{7}$	$\frac{189}{66}$
1994	$\frac{12}{1}$	$\frac{11}{1}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{6}{2}$	$\frac{4}{2}$	$\frac{13}{7}$	$\frac{14}{4}$	$\frac{20}{11}$	$\frac{4}{1}$	$\frac{10}{1}$	$\frac{9}{-}$	$\frac{1}{-}$	$\frac{108}{33}$
1995	$\frac{1}{-}$	$\frac{5}{-}$	$\frac{11}{2}$	$\frac{3}{2}$	-	$\frac{11}{6}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{13}{5}$	$\frac{19}{2}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{10}{2}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{84}{27}$
1996	$\frac{5}{3}$	$\frac{2}{-}$	$\frac{2}{-}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{11}{4}$	$\frac{3}{-}$	Нет данных						$\frac{28}{9}$
Σ	$\frac{149}{43}$	$\frac{124}{46}$	$\frac{70}{26}$	$\frac{119}{46}$	$\frac{137}{41}$	$\frac{285}{64}$	$\frac{500}{103}$	$\frac{238}{75}$	$\frac{90}{28}$	$\frac{163}{31}$	$\frac{86}{19}$	$\frac{109}{41}$	$\frac{2070}{593}$

За этот период зафиксировано 2070 отключений из них 593 с неуспешным АПВ. Из табл.4 также видно, что большинство отключений происходит в летние месяцы, это может быть объяснено природными явлениями (гроза, ветер и т.д.), а также интенсивными ремонтными работами на ЛЭП, в процессе которых вероятны ошибки обслуживающего и ремонтного персонала.

Линии 330 кВ отключались 184 раза из них 116 раз с успешным АПВ. Суммарное время простоя составило 375 ч. Максимальное время, которое потребовалось на восстановление работоспособности (61 ч 11 мин), зафиксировано 11 ноября 1983 г. из-за обрыва провода. Среднее время восстановления составляет 5 ч 30 мин. Гроза и ветер в 55% случаях являлись виновниками отключений линии.

Линии 150 кВ отключались 817 раз из них с успешным АПВ 567 раз, т.е. более 70%. Суммарное время простоя составило 2140 ч. Максимальное время (213 ч 17 м), которое потребовалось на восстановление работоспособности линии зафиксировано 14 января 1989 г. Среднее время восстановления – 8 ч 30 мин. Гроза и ветер в 49% случаях являлись основной причиной отключений линии.

Линии 110 кВ отключались 926 раз из них с успешным АПВ 750 раз, т.е. более 67%. Суммарное время простоя составило 1887 ч. Максимальное время (107 ч 39 мин), которое потребовалось на восстановление работоспособности линии, зафиксировано

6 января 1981 г. из-за обрыва провода. Среднее время восстановления – 1 ч 50 мин. Гроза и ветер в 49% случаях являлись виновниками отключений линии.

Линии 35 кВ отключались 144 раза из них с успешным АПВ 91 раз, т.е. более 63%. Суммарное время простоя составило 488 ч. Максимальное время (75 ч 50 мин), которое потребовалось на восстановление работоспособности линии, зафиксировано 14 декабря 1992 г. Среднее время восстановления – 9 ч 12 мин. Гроза и ветер в 40% случаях являлись виновниками отключений линии.

Проанализируем отказы линий 150 кВ более подробно. Анализ произведен для 21 линии общей протяженностью 2485 км. Данные об отказах линий 150 кВ за период с 1980 по 1996 гг. приведены в табл.5.

Таблица 5

Данные об отказах воздушных линий 150 кВ

Год	Месяц												Σ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1996	2	0	0	0	1	2	-	-	-	-	-	-	5
1995	0	0	1	0	0	2	1	4	15	2	4	2	31
1994	4	3	3	1	0	1	4	13	0	2	0	0	31
1993	9	17	3	3	0	1	13	2	1	2	3	0	54
1992	1	3	1	0	12	8	28	42	3	0	0	7	105
1991	2	0	0	0	0	4	4	2	3	1	2	0	18
1990	0	2	0	4	1	3	2	2	0	3	2	1	20
1989	2	0	2	2	3	18	28	7	1	5	1	1	70
1988	1	1	3	0	1	18	24	3	1	26	1	2	81
1987	5	2	0	1	1	0	24	1	0	2	0	7	43
1986	8	2	0	3	0	2	11	5	2	2	2	1	38
1985	0	2	2	0	0	21	3	5	3	22	0	4	62
1984	6	5	1	4	3	6	17	8	2	1	3	4	60
1983	4	12	1	2	15	1	10	2	6	3	3	6	65
1982	3	0	2	9	1	7	7	5	2	7	2	2	47
1981	2	1	0	0	2	4	7	4	1	3	0	0	24
1980	1	2	1	1	2	21	9	20	0	0	5	1	63
Σ	50	52	20	30	42	119	192	125	40	81	28	38	817

В результате анализа отказов выявлено, что равномерного распределения по годам не наблюдается. Наибольшее количество случаев приходится на 1992 г., что может быть объяснено только аномальными явлениями природы в этом году. По временам года наибольшее число случаев падает на лето каждого рассматриваемого года, что может быть объяснено природными явлениями и интенсивными ремонтными работами на ЛЭП.

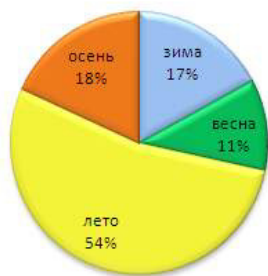


Рис.6. Диаграмма распределения отказов воздушных линий электропередач 150 кВ по временам года

За 16-летний период выявлено 817 отказов воздушных линий электропередачи 150 кВ энергосистемы, из них 75% отказов приходится на теплые месяцы, с мая по октябрь (рис.6), а 328 произошли по причине «гроза».

## Оценка показателей надежности работы ВЛ

Для оценки показателей надежности воздушных линий электропередач данного вида (определяемого напряжением линии и материалом опор) воспользуемся наиболее простой моделью отказов, в которой количество отказов с отключением линии принято пропорциональным ее длине.

Важнейшим показателем надежности воздушных линий электропередач является параметр потока отказов. Оценка этой характеристики, отказ/(100 км·год), для каждой отдельной линии электропередачи по данным об эксплуатации за ряд лет осуществляется по формуле [2]:

$$\omega_i = \frac{100 \cdot m_i}{L_i \cdot T_i}, \quad (1)$$

где  $m_i$  – число отказов  $i$ -й линии за промежуток времени  $T_i$  лет эксплуатации;  $L_i$  – длина линии, км; 100 – условная единица длины линии, принятая равной 100 км.

Результаты определения параметра потока отказа для одноцепных и двухцепных линий сведены в табл.6 и 7, где приведены расчеты параметра потока отказов при грозových отключениях ( $m_g$ ,  $\omega_g$ , 1/год), а также коэффициент успешности АПВ ( $k_{АПВ}$ ).

Таблица 6

Параметр потока отказов ВЛ 150 кВ

№ ВЛ	$L$ , км	$T$ , лет	$m$	$\omega$ , 1/год	$m_g$	$\omega_g$ , 1/год	$m_{АПВ}$	$k_{АПВ}$
Л-1	33.6	16	93	17.30	42	7.81	61	65.6
Л-2	155.3	16	108	4.35	49	1.97	81	75
Л-3	95.3	16	52	3.41	22	1.44	43	82.7
Л-4	55.8	16	33	3.70	17	1.90	30	90.9
Л-5	41.6	16	14	2.10	6	0.90	8	57.1
Л-6	74.7	16	58	4.85	29	2.43	42	72.4
Л-7	18.6	16	12	4.03	4	1.34	12	100
Л-8	100.8	16	79	4.90	39	2.42	58	73.4
Л-9	101.6	16	37	2.28	26	1.60	29	78.4
Л-10	15.1	16	7	2.90	1	0.41	4	57.1
Л-11	15.2	16	13	5.35	1	0.41	8	61.5
Л-12	25.6	15	3	0.78	2	0.52	1	33.3
Л-13	25.6	15	5	1.30	1	0.26	2	40
Л-14	55.5	16	13	1.46	7	0.79	9	69.2
Л-15	3.2	14	13	29.02	1	2.23	6	46.2
Л-16	1	15	8	53.33	2	13.33	3	37.5
Л-17	44	12	1	0.19	1	0.19	1	100
Итого	862.5		549	4.05	250	1.84	398	67.1

Наблюдается связь числа отключений и длины линий, но есть значительные отклонения, связанные с различием климатических условий территорий, в которых расположены линии (рис.7).

Таблица 7

Параметр потока отказов двухцепных ВЛ 150 кВ

№ ВЛ	L, км	m	T, лет	$\omega$ , 1/год	$m_r$	$\omega_r$ , 1/год	$m_{АПВ}$	$k_{АПВ}$
Л-18/19	122.3	132/76	16	6.75/3.88	62/40	3.17/2.04	98	74.2
Л-20/21	55.3	29/12	16	3.28/1.36	16/10	1.81/1.13	28	96.6
Л-22/23	1.9	14/2	16	46.05/6.58	-	-	0	0.0
Л-24/25	4.9	5/4	16	6.38/5.1	-	-	4	80.0
Л-26/27	2.3	7/2	14	21.74/6.21	-	-	4	57.1
Л-28/29	13.2	1/-	9	0.84/-	-	-	0	0.0
Л-30/31	2.6	23/2	9	98.29/8.55	-	-	11	47.8
Л-32/33	2.6	4/-	9	17.09/-	-	-	3	75.0
Л-34/35	0.9	9/-	15	66.67/-	-	-	2	22.2
Л-36/37	3.3	44/14	15	88.89/28.28	-	-	18	40.9
Итого	209.3	268/112	-	8.35/3.49	78/50	2.43/1.56	168	49.4

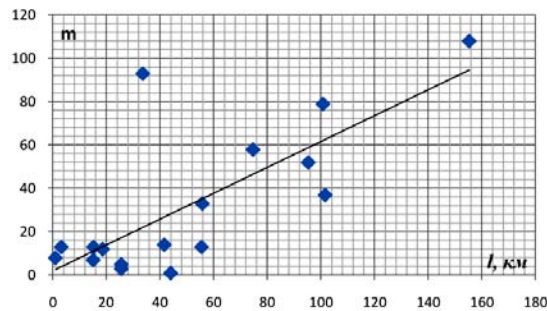


Рис. 7. Распределение отключений от протяженности ВЛ

Общий параметр потока отказа для линии 150 кВ может быть определен из соотношения:

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i L_i T_i}{\sum_{i=1}^n L_i T_i}, \quad (2)$$

где  $n$  – общее число линий, входящих в совокупность данного вида. Параметр потока отказа для одноцепных линий 150 кВ, определенный по (2), равен 4.05 1/год, т.е. в среднем четыре отказа в год.

Эта же модель применима для одной цепи двухцепной линии или для двухцепной линии, когда критерием отказа принят одновременный отказ обеих цепей линии по одной причине [3].

Определение параметра потока отказов двухцепной линии приведем на примере воздушной линии 18/19:

1) отказ одной цепи:

$$\omega_{\hat{A}\hat{E}-18/19} = \frac{m_{\hat{A}\hat{E}-18/19} \cdot 100}{L_{\hat{A}\hat{E}-18/19} \cdot T_{\hat{A}\hat{E}-18/19}} = \frac{132 \cdot 100}{122.3 \cdot 16} = 6.75 \text{ (1/год);}$$

2) одновременный отказ обеих цепей линии по одной причине:

$$\omega_{\hat{A}\hat{E}-18/19} = \frac{m_{\hat{A}\hat{E}-18/19} \cdot 100}{L_{\hat{A}\hat{E}-18/19} \cdot T_{\hat{A}\hat{E}-18/19}} = \frac{76 \cdot 100}{122.3 \cdot 16} = 3.88 \text{ (1/год),}$$

то есть почти четыре отказа в год.

Полученные результаты расчетов параметра потока отказов существенно отличаются от справочных данных (табл. 1).

## **Выводы**

Приведены результаты анализа опыта эксплуатации, нарушений, отказов и аварий в высоковольтных сетях, расположенных на Кольском полуострове. Получены удельные показатели отключений, оценки показателей надежности ВЛ 35, 110 и 150 кВ, а также показатели успешности работы АПВ.

Показана специфика региона.

1. Рассмотрены данные эксплуатации ВЛ 35-150 кВ, расположенных в северной части Кольской энергосистемы. Общий объем наблюдений составил более 53 тыс. км·лет, в том числе для ВЛ 150 кВ – 32 тыс. км·лет; 110 кВ – 8 тыс. км·лет; 35 кВ – 13 тыс. км·лет.

2. По данным об отключениях линий 35-330 кВ за двадцатилетний период среднее удельное число отключений на 100 км длины в год составило: для ВЛ 330 кВ – 1.57, 150 кВ – 2.3, 110 кВ – 1.67, 35 кВ – 1.52, что соответствует отключениям в средней полосе. Из общего числа отключений к грозovým относятся около 34%.

3. По данным работы АПВ коэффициент успешности для одноцепных и двухцепных ВЛ, расположенных в северной части Кольского п-ова, соответственно составил 0.67 и 0.49. Это свидетельствует о нецелесообразности двухцепных линий в районах с низкой проводимостью грунта.

## **Литература**

1. Правила устройства электроустановок. Раздел 2. Передача электроэнергии. Главы 2.4, 2.5. – 7-е изд. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2003.
2. Трубицын В.И. Оценка надежности схем электрических соединений станций и подстанций: учебно-методическое пособие / В.И.Трубицын. – М.: ИУЭ ГУУ, ВИПКэнерго; ИПКгосслужбы, 2003. – 100 с.
3. Барг И.Г. Предложения по определению эксплуатационных показателей надежности основных видов электрооборудования и линий электропередачи / И.Г.Барг. – М.: ОРГРЭС, 1997. – 213 с.
4. Отчеты о грозовой деятельности ОАО «Колэнерго».
5. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1-6, вып.2. Мурманская область. Л.: Гидрометеиздат, 1988.
6. Вопросы грозозащиты воздушных линий в условиях севера Кольского полуострова: требования, опыт эксплуатации ВЛ 110-150 кВ, методика расчета / А.Н.Новикова, О.В.Шмараго, Б.В.Ефимов, А.Н.Данилин, Ю.М.Невретдинов, В.Н.Селиванов // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. Вып.3. – Апатиты, 2011. – 224 с.
7. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений: РД 153-34.3-35.129-99. – СПб: Изд-во ПЭИПК, 1999.

## **Сведения об авторах**

### **Ярошевич Вера Васильевна**

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

### **Невретдинов Юрий Масумович**

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

УДК 621.311

**М.Б.Баранник, А.В.Евстигнеев, В.В.Колобов**

## **АСПЕКТЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОСТАТОЧНОСТИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ УСТРОЙСТВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СРАБАТЫВАНИЯ ОПН**

### **Аннотация**

Дано краткое описание различных типов регистраторов срабатывания вентильных разрядников и ОПН. Рассмотрены вопросы их применения в условиях действующих подстанций. Приведены устройство и описание принципа работы регистратора срабатываний ОПН, разработанного в ЦФТПЭС КНЦ РАН. Представлены результаты исследования электромагнитной совместимости разработанного устройства при эксплуатации.

### **Ключевые слова:**

*ограничители перенапряжений нелинейные, импульсные токи, регистратор срабатываний, электромагнитная совместимость.*

**M.B.Barannik, A.V.Evstigneev, V.V.Kolobov**

## **ASPECTS OF FUNCTIONALITY AND ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF SURGE COUNTERS**

### **Abstract**

Several types of surge counters are described. Some reasons for using surge counters on arresters are considered. Results of development of a surge counter for arresters at the Centre of Physical and Technical Problems of the Northern Energetics of KSC RAS are presented. Electromagnetic compatibility aspects of the device are described.

### **Keywords:**

*surge arresters, switching and lightning surge currents, surge counter, electromagnetic compatibility.*

Исторически первыми появились системы регистрации срабатываний вентильных разрядников предыдущего относительно ОПН поколения аппаратов, предназначенных для защиты оборудования сетей от импульсных перенапряжений. В цепи заземления вентильных разрядников устанавливались счетчики числа срабатываний. Необходимость установки таких устройств была тесно связана с принципом работы вентильных разрядников, имеющих последовательные искровые промежутки. При возникновении импульсных перенапряжений опасной величины (как правило, грозовых перенапряжений) искровой промежуток пробивался и в нелинейном сопротивлении разрядника протекал ток, что приводило к ограничению перенапряжений за счет перехода энергии перенапряжений в тепловую, выделяющуюся в нелинейных элементах.

Помимо импульсного тока, в разряднике протекал сопровождающий ток промышленной частоты. При первом переходе тока через ноль дуга в искровом промежутке гасла и разрядник переходил в исходное состояние. Величина сопровождающего тока [1] могла достигать десятков ампер, но не превосходила 80-100 А, так как в противном случае искровой промежуток не обеспечивал гашение дуги (в разрядниках легкого режима по ГОСТ 16357-83). Энергия, выделяющаяся в нелинейном сопротивлении разрядника за одно срабатывание искрового промежутка, может быть определена как:

$$W_{\text{ДА}} = W_{\text{ИП}} + W_{50\text{ Гц}},$$

где  $W_{\text{ИП}}$  – энергия импульсного тока;  $W_{50\text{ Гц}}$  – энергия сопровождающего тока промышленной частоты.

Так как нелинейность вольт-амперной характеристики элементов разрядников была выражена слабо, сопровождающий ток был заметной величины и при каждом срабатывании давал ощутимое тепловыделение за счет энергии  $W_{50\Gamma_d}$  вне зависимости от того, какой энергией обладали импульсные перенапряжения  $W_{\text{имп}}$ . С учетом свойств материала нелинейных элементов (как правило, это вилит) каждое срабатывание искрового промежутка вне зависимости от энергии импульсных перенапряжений приводило к заметному снижению остаточного ресурса элементов разрядника.

Согласно [2] вентильный разрядник рассчитан на 20-30 срабатываний. Если число срабатываний, зафиксированных в ходе эксплуатации при помощи счетчиков, оказывалось заметно больше, то это являлось основанием для вывода разрядника из эксплуатации. Поскольку для разрядника важным является сам факт срабатывания, т.е. число случаев протекания сопровождающего тока, то параметры импульсных токов (величина  $W_{\text{имп}}$ ) имели второстепенное значение. Это позволяло использовать счетчики простой конструкции.

В настоящее время широкое распространение получил новый тип защитных аппаратов – ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН). Такой защитный аппарат не имеет искровых промежутков. Основным элементом ОПН являются оксидно-цинковые варисторы (ОЦВ). Принцип действия ОПН основан на том, что ОЦВ имеют резко нелинейную вольт-амперную характеристику. При отсутствии перенапряжений ОПН не пропускает ток, но как только на участке сети возникает перенапряжение, сопротивление ОПН резко снижается, что и обеспечивает эффект защиты от перенапряжения. После окончания действия перенапряжения на выводах ОПН его сопротивление опять возрастает. Переход из «закрытого» в «открытое» состояние занимает единицы наносекунд. Кроме высокой скорости срабатывания ОПН обладает еще рядом преимуществ. Одним из них является стабильность характеристики ОЦВ после неоднократного срабатывания вплоть до окончания указанного времени эксплуатации [3].

В процессе эксплуатации ОПН подвергаются воздействию как рабочего напряжения сети, так и различных видов перенапряжений. Достаточно часто возникает вопрос о необходимости оснащения ОПН регистраторами срабатываний [4]. Как правило, речь идет об использовании регистраторов лишь совместно с ОПН класса напряжения 110-750 кВ, поскольку стоимость таких устройств регистрации оказывается высокой по сравнению со стоимостью самих ОПН на напряжение 6-35 кВ.

Основная цель установки регистраторов срабатывания на современных оксидно-цинковых ограничителях – это выявление конкретных аппаратов и участков сети, подверженных большому количеству перенапряжений, вызывающих срабатывание ОПН. Причинами перенапряжений могут быть коммутации, короткие замыкания на линии вследствие попадания молнии. В этом случае хотя и подтверждается необходимость применения ОПН, может быть оправдано принятие некоторых предупредительных мер для ограничения количества перенапряжений.

ОПН рассчитаны на длительное воздействие напряжения  $U_{\text{нрo}}$  промышленной частоты. В случае если напряжение промышленной частоты не повышается сверх  $U_{\text{нрo}}$ , заметная энергия может выделяться в варисторах ОПН лишь при импульсных перенапряжениях, сопровождаемых импульсными токами:

$$W_{\text{iii}} = W_{\text{eii}} .$$

При правильном выборе  $U_{\text{нрo}}$  ресурс ОПН определяется импульсными токами и, в отличие от разрядников, не зависит от тока проводимости под рабочим напряжением сети. Степень опасности для ОПН импульсных токов определяется выделяющейся при их протекании энергией:

$$W_{\text{ЭИИ}} = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt,$$

которая зависит как от величины, так и от длительности импульсного тока. Вместе с тем регистраторы числа срабатываний реагируют на факт протекания тока, величина которого больше определенного значения, и никак не учитывают форму импульсного тока, а значит не дают представления об энергии, которая выделяется в ОПН.

Для иллюстрации этого на рис.1 приведены два импульса тока при грозовых перенапряжениях в типовом ОПН 110 кВ одинаковой амплитуды и различной длительности. На рис.2 приведены расчетные энергии, выделяющиеся в ОПН под воздействием этих импульсов с учетом того, что остающееся напряжение при грозовом импульсном токе 2-10 кА формы 8/20 мкс составляет 250 кВ. Как видно из рисунка, несмотря на равенство максимальных значений токов (около 4 кА), выделяющаяся энергия для первого импульса (около 10 кДж) в 4 раза меньше, чем для второго (около 40 кДж).

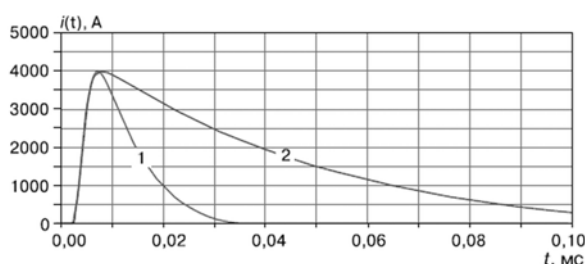


Рис.1. Осциллограмма двух грозовых импульсных токов с одинаковой амплитудой, но различной длительностью

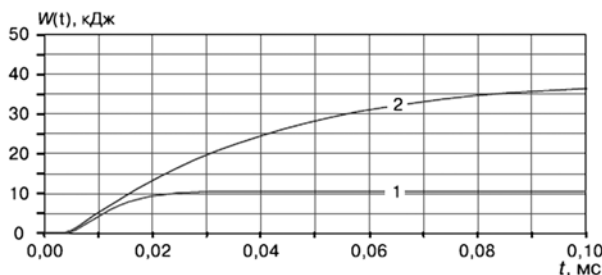


Рис.2. Расчетная энергия, выделяющаяся в типовом ОПН 110 кВ при протекании двух одинаковых по амплитуде, но различных по длительности импульсов тока: с энергией около 10 кДж (1) и с энергией около 40 кДж (2)

Счетчики числа срабатываний (при должном принципе работы и качестве изготовления) могут давать представление лишь о том, сколько раз ОПН пропускал импульсные токи. Такая информация теоретически может быть полезна для того, чтобы оценить эффективность работы ОПН в той или иной точке сети: если ОПН не работает, то зачем его ставить? Однако на практике даже в случае нулевых показаний счетчика отказ от установки ОПН вряд ли возможен. Во-первых, потому что нет уверенности в корректной работе счетчика, а во-вторых – вследствие статистической природы грозовых и коммутационных перенапряжений. Например, согласно [5] опасные грозовые перенапряжения, способные повредить изоляцию оборудования распределительного устройства, могут в типовых схемах возникать один раз в сотни лет эксплуатации, т.е. вполне возможно ни разу за срок службы конкретного ОПН (25-30 лет).



Действительно, полезную информацию о срабатываниях ОПН могли бы дать более сложные по сравнению со счетчиками устройства – такие, которые давали бы представление о выделяющейся в ОПН энергии, т.е. которые были бы построены на принципе интегрирования кривой тока [4]. Подобные устройства, очевидно, будут гораздо дороже простейших счетчиков, и об их массовом применении совместно с ОПН 110-750 кВ говорить не приходится.

Предположим, при помощи сложных устройств регистрации будет достоверно известна суммарная величина энергии  $W_{ОПН}^{СУМ}$  перенапряжений, которая выделилась в ОПН в процессе эксплуатации. Эту энергию можно было бы использовать для принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации ОПН только в том случае, если бы был известен ресурс конкретного ОПН по энергии  $W_{ОПН}^{МАКС}$ .

Понятие ресурса ОПН рассмотрено в [5] (приложение 8), где в качестве примера приведены расчеты для ОПН 750 кВ. Несмотря на это, отечественные и зарубежные производители ОПН понятие «ресурс ОПН» не вводят (по крайней мере в том смысле, о котором говорится в [5]), и оно не используется при выборе ОПН.

Методика выбора ОПН, основанная на понятии ресурса, достаточно сложно реализуема, поскольку:

- свойства нелинейных сопротивлений (варисторов) ОПН таковы, что эти варисторы обладают значительным ресурсом, «точное» значение которого в испытаниях не выявить;
- по своим последствиям для варисторов ОПН нельзя приравнять один импульс тока с энергией  $W_{ИМП}$  и десять импульсов тока с энергией  $0.1 \cdot W_{ЭИ}$  ;
- изменения свойств варисторов, вызванные протеканием в них импульсных токов, компенсируются последующим воздействием на варисторы рабочего напряжения сети.

Оценка состояния ОПН в эксплуатации, как и методика выбора ОПН, не могут быть построены на основе информации о суммарной выделенной энергии  $W_{ОПН}^{СУМ}$ . Поэтому регистраторы срабатываний ОПН, которые могли бы дать информацию  $W_{ОПН}^{СУМ}$ , не позволяют сделать конкретные выводы. Такие регистраторы могут быть полезны для сбора статистических данных о величинах импульсных токов и поглощенной ОПН энергии с привязкой ко времени, что представляет научный интерес.

Рассмотрим устройство и принцип работы регистратора срабатываний ОПН, разработанный в ЦФТПЭС КНЦ РАН. Данный регистратор срабатываний устанавливается в разрыв цепи заземления ОПН. В его составе (рис.3.) можно выделить следующие функциональные узлы: датчик тока (ДТ), преобразователь тока, микроконтроллер (МК), модуль UART (приемопередатчик), источник питания (ИП).

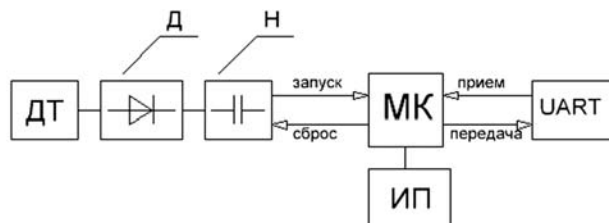


Рис.3. Структурная схема регистратора срабатываний ОПН:

ДТ – датчик тока; Д – детектор; Н – накопитель; МК – микроконтроллер; ИП – источник питания; UART – приемопередатчик

Датчик тока по принципу действия представляет собой трансформатор тока. Первичной обмоткой является шпилька, включенная в цепь заземления защитного

устройства и имеющая электрическое соединение с корпусом регистратора. Катушка вторичной обмотки трансформатора тока состоит из 180 витков. Сигнал с нее поступает на преобразователь тока. Преобразователь тока включает в свой состав детектор (Д) и накопитель (Н). Для защиты преобразователя тока и всей схемы в целом от напряжений, превышающих величину 20 В, на входе установлен варистор (на схеме не показан). В преобразователе тока импульсный сигнал преобразуется в постоянное напряжение, пропорциональное заряду протекающего через ОПН импульса тока. Напряжение с выхода преобразователя поступает на микроконтроллер (МК), который регистрирует в памяти количество импульсов с зарядом, превышающим 20 мкКл, с привязкой ко времени и дате. Для связи регистратора с внешними устройствами в схеме предусмотрен модуль UART (приемопередатчик). Этот модуль предназначен для настройки регистратора, а также для передачи данных о числе срабатываний, хранящихся в памяти МК. Также в регистраторе предусмотрена схема сброса (разряд накопителя преобразователя тока) для обеспечения регистрации последующих срабатываний ОПН.

Питание регистратора осуществляется от литий-тионилхлоридной батареи напряжением 3.6 В. Данный вид источников питания появился сравнительно недавно и обладает улучшенными характеристиками (повышенная емкость, низкий уровень саморазряда, морозостойкость), что обеспечивает автономное функционирование регистратора в течение нескольких лет даже в суровых климатических условиях. Кроме того, для увеличения времени работы регистратора от одного элемента питания предусмотрен переход микроконтроллера в режим пониженного энергопотребления при отсутствии импульсов тока через ОПН. Отсутствие необходимости прокладки кабеля внешнего питания к ОПН, оснащенный регистратором, обеспечивает простоту установки устройства и увеличивает его надежность. Регистратор производит постоянный контроль срабатываний ОПН, фиксируя дату и время срабатывания. Все данные регистратор сохраняет в энергонезависимой памяти (EEPROM), что позволяет сохранить информацию в случае отказа модуля или отключения его питания. Все данные из памяти регистратора можно считать специальным устройством, подключаемым по интерфейсу UART.

Так как разработанный регистратор является электронным устройством, выполненным на основе однокристального микроконтроллера, возникает вопрос помехозащищенности и устойчивого функционирования в условиях мощных электромагнитных воздействий, возникающих при протекании через ОПН импульсных токов. Другими словами, возникает проблема электромагнитной совместимости устройства и регистрируемых им импульсных токов через ОПН. Учитывая индуктивный характер воздействия импульсов тока на окружающие проводники, напряжение на участках цепей схемы регистратора определяется как:

$$U_{\text{I}} = M \cdot \left( \frac{di}{dt} \right),$$

где  $M$  – взаимная индуктивность участка электронной цепи и первичной обмотки трансформатора тока регистратора. Таким образом, необходимым является сохранение работоспособности устройства при высоких скоростях нарастания импульсов тока ( $di/dt$ ), которые в реальных грозовых импульсах могут достигать 10 кА/мкс.

С целью определения максимально допустимого фронта волны тока, проходящей в цепи заземления ОПН и не приводящей к сбою в работе регистратора, был выполнен испытательный стенд (рис.4).

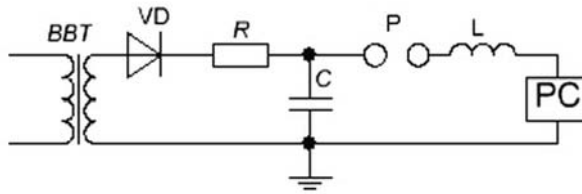


Рис.4. Схема испытательного стенда:

*BBT* – высоковольтный трансформатор; *P* – разрядник; *PC* – испытываемый регистратор срабатывания ОПН

Для величины амплитудного воздействия импульса тока можно записать:

$$I = \frac{U}{\sqrt{L/C}},$$

где  $U$  – напряжение заряда емкости. Величина фронта волны тока (скорость нарастания) определяется как:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U}{L}.$$

В ходе проведенных испытаний было установлено, что разработанный регистратор способен без сбоев выдерживать прохождение импульсных токов с амплитудой до 15 кА и скоростью нарастания до 10 кА/мкс.

Таким образом, разработанный регистратор срабатываний ОПН может успешно применяться в условиях действующих высоковольтных подстанций для подсчета количества импульсов тока, протекающих через ОПН класса 110-750 кВ, под воздействием импульсных перенапряжений.

## Литература

1. Техника высоких напряжений / под научной редакцией Г.С.Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат, 2003. – 608 с.
2. Техника высоких напряжений / под общей редакцией Д.В.Разевига. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1963. – 472 с.
3. Баранник М.Б. 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.
4. Баранник М.Б. Разработка устройства регистрации импульсных токов, протекающих через ОПН под воздействием коммутационных и грозовых перенапряжений в процессе эксплуатации / М.Б.Баранник, В.В.Колобов, П.И.Прокопчук // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Вып.6. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2013. – С. 86-96.
5. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений: РД 153-34.3-35.125-99 / под научной редакцией Н.Н.Тиходеева. – Изд. 2-е – СПб.: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. – 355 с.
6. Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше. – М.: ОРГРЭС, 1998.
7. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ. – М.: Изд-во НТК «Электропроект», 2000.

### ***Сведения об авторах***

#### **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

#### **Евстигнеев Артем Викторович**

студент Кольского филиала Петрозаводского государственного университета  
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, ул.Космонавтов, д.3  
эл. почта: evstigneevapacity@rambler.ru

#### **Колобов Виталий Валентинович**

ведущий научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии  
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,  
кандидат технических наук  
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д.21А  
эл. почта: 1\_i@mail.ru

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

---

УДК 620.9.001.5

Ю.П.Кубарьков, А.Ю.Рыгалов, Я.В.Макаров, А.С.Карпов

## БАЛАНСОВЫЙ РАСЧЕТ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

### Аннотация

Проведен анализ существующей энергосистемы, а также рассмотрены тенденции ее развития. Рассмотрен способ управления энергосистемой и расчета баланса мощностей на основе мультиагентной системы.

### Ключевые слова:

*энергосистема, моделирование, мультиагентная система, баланс мощностей.*

Y.P.Koubarkov, A.Yu.Rygalov, Ya.V.Makarov, A.S.Karpov

## BALANCE CALCULATION NETWORK USING MULTI-AGENT SYSTEM

### Abstract

Analysis of the current grid as well as its development tendencies are presented. The way of grid control and power balance calculation by applying multi-agent system is discussed.

### Keywords:

*grid, modeling, multi-agent system, balance of power.*

Ископаемые виды топлива являются невозобновляемыми ресурсами, и они же накладывают естественные ограничения на производство электроэнергии – их использование на протяжении последних столетий оказало негативное воздействие на окружающую среду. Глобальное потепление, которое частично возникает из-за парникового эффекта и связано с увеличением выбросов CO<sub>2</sub> в результате сжигания ископаемых ресурсов, также сдерживает расширение классической системы производства электроэнергии. В дополнение к этому, ископаемые виды топлива вносят значительный вклад в уровень загрязнения окружающей среды путем неэффективного и неустойчивого производства энергии [1].

Эти проблемы заставляют политиков искать решения для повышения уровня качества систем энергоснабжения. В то же время они должны гарантировать, что эти решения будут экономически доступными и технически безопасными. Таким образом, лица, принимающие решения (часто на правительственном уровне), оказывают влияние на заинтересованные стороны как в области производства, так и в области распределения электроэнергии.

Возможно, что иерархическая, однонаправленная структура электрической системы будет в значительной степени влиять на увеличение количества распределенных и интегрируемых источников. Таким образом, использование возобновляемых источников энергии будет возрастать. Значительные и иногда непредсказуемые колебания при производстве электроэнергии возобновляемыми источниками говорят о том, что системы управления, применяемые к классическим электростанциям, не могут применяться для них. Увеличение доли электроэнергии, поставляемой от возобновляемых источников, приводит к необходимости разработки новой системы управления и потребности в эффективных и гибких энергоблоках для компенсации этой изменчивости в генерации.

Есть ряд решений и путей, приводящих к «умной» энергосистеме, и это зависит от таких факторов, как расположение и местные условия, а также от различных видов национальной или региональной политики. Широко обсуждается вопрос об оптимальной структуре энергетики или реализации конкретных технологий, таких как «умные» датчики или электрические сети Smart Grid.

Для моделирования электрических систем использовались различные инструменты и, тем не менее, переход к парадигме «интеллектуальной» сети сейчас ставит вопрос о том, есть ли потребность в новых подходах, учитывая, что появляются все новые вопросы. Классическая электрическая система (рис.1.) представляет собой иерархическую и однонаправленную систему: производство концентрируется и внедряется с одной стороны, а спрос определяется с другой. Производство нужно только для того, чтобы гарантированно удовлетворить этот спрос.

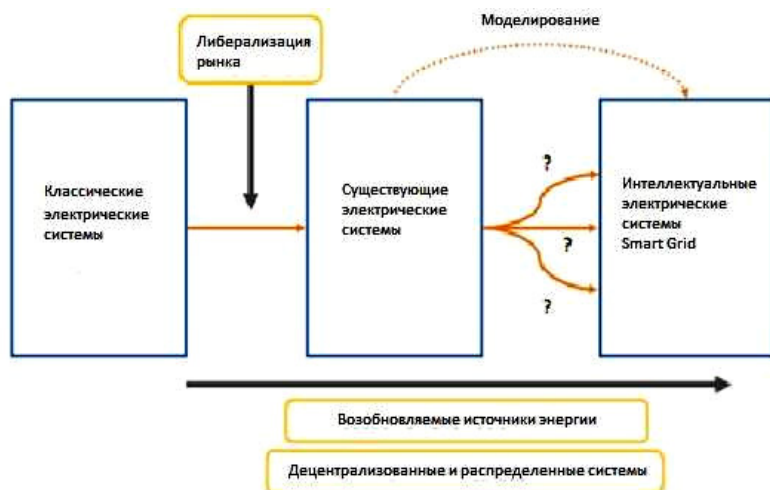


Рис.1. Эволюция электрической системы

Такой принцип больше не работает. Внедрение распределенного производства электроэнергии на более низких уровнях системы создало возможность местного производства, которое может инвертировать или хотя бы уменьшить классический однонаправленный поток от крупных станций в направлении конечного потребителя.

Для того чтобы правильно представить эту систему в интегрированном, системном подходе в первую очередь необходимо создать модель существующей физической системы. Репрезентация классической системы достигается с учетом текущих и будущих возможностей, что позволит ей постоянно расширяться. Сочетание модели с текущими технологиями, такими как «умные» измерения, распределенная и возобновляемая генерация и т.д., позволит представить современный уровень состояния энергетики [2].

Собрать подробные знания, необходимые для точного моделирования, системы является сложной задачей.

Эта статья рассматривает моделирование системы электроснабжения, но, тем не менее, дать определение этому термину не просто. Существуют различные сети в разных странах, каждая из которых создана с помощью различных технологий, и они все в целом образуют сложную систему. Отсюда возникает следующий вопрос: как можно сделать модель системы, которая полностью не известна?

Решение, принятое в данной работе, заключается в использовании проектных моделей системы в упрощенном виде, без акцентирования внимания на деталях. Таким образом, ставится цель создания системной модели, а не детальных моделей ее частей. Кроме того, создание индивидуально-ориентированной модели, а не модели системного уровня. Это означает, что отдельные части системы будут представлены как таковые, а не как совокупные модели [3].

Целью данной части работы является разработка и реализация элементов мультиагентных систем в контексте распределенных интеллектуальных сетей, или Smart Grid, расположенных на уровне распределительных систем электроснабжения.

Решающее значение для функционирования системы любой мощности имеет ее архитектура управления, состоящая из аппаратного и программного обеспечения для обмена протоколами состояния системы и сигналов управления. В обычных электроэнергетических системах это достигается путем диспетчерского управления и сбора данных (SCADA).

Современные тенденции для управления и контроля работы электроэнергетических систем, однако, направлены в сторону использования автоматизированной технологии агентов, которые известны как мультиагенты. Многоагентная система представляет собой комбинацию из нескольких агентов, работающих в сотрудничестве и решающих определенный круг задач для достижения общей системной цели.

Мультиагентная система становится все более мощным инструментом в разработке сложных систем, которые имеют преимущества в самих свойствах агентов: автономия, социальность, реактивность и проактивность.

Многоагентные системы автономны в том, что они могут работать без вмешательства человека, являются социально-ориентированными, так как взаимодействуют с другими агентами через язык общения, понятный всем участникам. Агенты также могут воспринимать и реагировать на возмущения окружающей среды. Наконец, мультиагентная система является активной и способна выступать с инициативами при проявлении изменений поведения в сети.

Применение данного метода в энергетике позволяет наиболее полно использовать имеющиеся вычислительные ресурсы и таким образом решать поставленные задачи значительно быстрее.

Подход, в основе которого лежит принцип присвоения собственного агента каждому элементу сети (например трансформатору Т-1 соответствует его агент Т-1, рис.2), является наиболее продуктивным и оправданным, так как в этом случае каждый агент отвечает только за свой элемент сети, содержит его параметры и характеристики (например для линии Л-1 это длина линии, ее активное и индуктивное сопротивления  $r$  и  $x$ , проводимость и емкость  $g$  и  $b$ ), а также производит вычисления, связанные только с этим элементом.

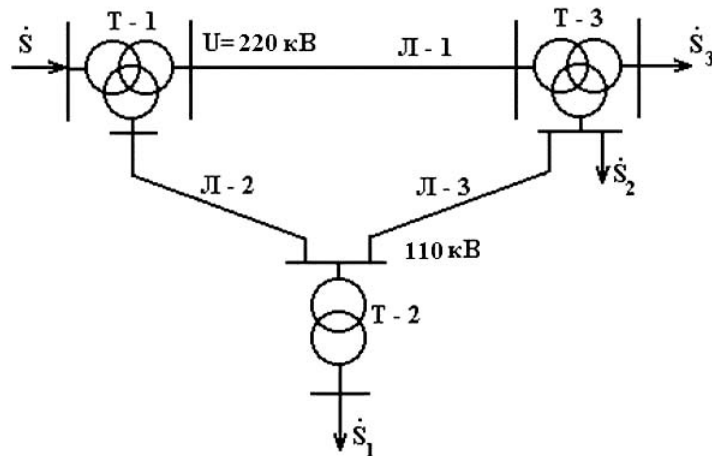


Рис.2. Схема сети

В контексте энергетических систем мультиагентные технологии могут быть применены в различных приложениях, таких как выполнение диагностики нарушений в энергосистеме, оценка возможности восстановления системы, осуществление контроля напряжения и мощности системы и визуализация параметров энергетической системы в режиме он-лайн [4].

При этом каждый агент, используя несколько простых формульных выражений, рассчитывает и определяет ряд величин, например, потери мощности, протекающей по элементу сети. Причем возможно определить потери как полной мощности, так и ее составляющих – активной и реактивной.

Как известно, наиболее трудной задачей является составления баланса мощностей, так как в ряде случаев точки потокораздела активной и реактивной мощностей могут не совпадать. Этот подход позволяет рассчитать и оценить величину передаваемой реактивной мощности, что может быть использовано для регулирования уровня напряжения, а также, зная величины мощностей, довольно просто можно вычислить расход и потери электроэнергии, умножив полученную мощность на время, в течение которого эта мощность потреблялась:

$$W = S \cdot t .$$

Однако в реальных системах значения потребляемых мощностей постоянно меняются. Чтобы решить эту задачу, можно задаться определенным интервалом времени и, принимая, что мощность на этом интервале будет постоянной, рассчитывать для каждого интервала новое значение расхода электроэнергии и потери. Или же, наоборот, определить или задать диапазон, в котором изменение мощности будет считаться незначительным. В любом случае итоговый график мощности будет делиться на некоторые отрезки времени с постоянными значениями мощности вдоль них. Такой подход однозначно будет вносить дополнительную погрешность в расчет, однако он позволит несколько разгрузить вычислительную систему, а при правильном выборе расчетного интервала (время или мощность) нивелировать величину вносимой погрешности.

Таким образом, рассчитав потери электроэнергии в искомом элементе, их можно учесть в последующих расчетах и получить наиболее полную картину потерь всей сети поэлементно. Однако для упрощения достаточно производить расчет только в ключевых точках, например, агентами питающих и потребляющих шин подстанций. При этом возможно еще более значительное сокращение времени расчета и оценки потерь.

## **Выводы**

1. Существующая энергосистема в настоящий момент претерпевает значительные изменения.
2. Принципы управления, применяемые к классической электрической системе, уже не работают.
3. Наиболее перспективным подходом для решения возникающих задач видится применение мультиагентных систем.
4. Эти системы позволяют наиболее полно использовать имеющиеся ресурсы и затрачивать при этом значительно меньшее количество времени.

## **Литература**

1. Маслобоев А.В. Мультиагентная технология информационной поддержки инновационной деятельности в регионе / А.В.Маслобоев // Прикладные проблемы управления макросистемами. – Апатиты: КНЦ РАН, 2008. – С. 42-43.
2. Рассел С. Искусственный интеллект. Современный подход / С.Рассел, П.Норвиг. – Изд. 2-е. – М.,2006. – 1408 с.
3. Захаров В.Н. Интеллектуальные системы управления: основные понятия и определения / В.Н.Захаров // Теория и системы управления. – 1997. – № 3. – С. 138-145.
4. Vidal J. Fundamentals of multiagent systems with NetLogo examples [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.multiagent.com](http://www.multiagent.com)



### **Сведения об авторах**

#### **Кубарьков Юрий Петрович**

доцент Самарского государственного технического университета,  
кандидат технических наук  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244  
тел. 8-(846)-242-37-89; эл. почта: tsara.cuba@yandex.ru

#### **Рыгалов Алексей Юрьевич**

ассистент Самарского государственного технического университета  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244  
тел. 8-(846)-242-37-89

#### **Макаров Ярослав Викторович**

инженер Самарского государственного технического университета  
Россия 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244  
тел. 8-(846)-242-37-89

#### **Карпов Алексей Сергеевич**

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

УДК 620.9.001.5

**Ю.П.Кубарьков, А.Ю.Рыгалов, Я.В.Макаров, А.С.Карпов**

### **АНАЛИЗ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ**

#### **Аннотация**

Проведен анализ аварийных состояний сети, а также рассмотрены способы восстановления электроснабжения потребителей с использованием мультиагентной системы.

#### **Ключевые слова:**

*мультиагентная система, восстановление питания потребителей, моделирование.*

**Y.P.Koubarkov, A.Yu.Rygalov, Ya.V.Makarov, A.S.Karpov**

### **ANALYSIS AND RECOVERY OF POWER SUPPLY SYSTEM OPERATION MODES BY APPLYING MULTI-AGENT SYSTEM**

#### **Abstract**

Network emergency condition analysis has been made and, the ways of consumer power supply restoration by applying multi-agent system are discussed.

#### **Keywords:**

*multi-agent system, consumer power supply restoration, modeling.*

В настоящее время все больший интерес приобретает применение интеллектуальных компьютерных агентов для решения различного рода сложных задач с точки зрения аналитики. Агентно-ориентированные системы и технологии уже находят свое применение в ряде организаций, где они успешно справляются с поставленными задачами. Применение агентно-ориентированных систем в энергетике является новой ветвью данного направления. Опыт внедрения в некоторых зарубежных электроэнергетических сетях показывает неоднозначные результаты ввиду не проработанности вопроса: если одни системы нормально функционируют, то другие, наоборот, отказываются хоть как-то функционировать. Однако данное направление является перспективным и наиболее приоритетным из уже существующих технологий управления [1].

При возникновении короткого замыкания (КЗ) или выходе линии электропередач из строя ее отключает автоматика, и первый, кто почувствует на себе последствия этого явления, будет потребитель, а затем и диспетчер.

Если линия, питающая потребителя, является единственной (т.е. тупиковой), то потребитель останется без питания на время ее ремонта. Если же линия не единственная, то произойдет перераспределение нагрузки на оставшиеся в рабочем состоянии линии. При этом потери электроэнергии возрастают и падение напряжения из-за протекания большего тока по оставшимся линиям, соответственно, тоже увеличивается. При этом диспетчер проверяет допустимость установившегося режима и при необходимости производит оперативные переключения.

Также имеется еще один вариант развития событий: потребитель питался от двух различных источников посредством двух линий электропередач и одна из них вышла из строя. Тогда часть потребителей может потерять питание, ввиду того что при перераспределении мощности потери возрастут и баланс мощностей может быть не соблюден. В свою очередь диспетчеру необходимо согласовать работу, скорректировать графики нагрузки электрических станций и произвести соответствующие переключения в сети.

Как видно из вышеописанного, переходный режим при возникновении нештатной ситуации может значительно затянуться, а новый установившийся режим может требовать оптимизации по критериям минимума потерь электроэнергии и допустимых падений напряжения.

Сейчас для расчета сложных электрических сетей применяется метод расчета, требующий составления схемы замещения сети. Однако полную схему сети составить чрезвычайно сложно из-за недостатка данных о фактическом состоянии оборудования. При этом, даже если удастся ее составить, то расчет производится для установившегося режима всей сети, что является сложной задачей и занимает значительное время, а также из-за пробелов в исходных данных возникают дополнительные погрешности.

Предлагаемая мультиагентная система действует по совершенно иному алгоритму. Во-первых, каждая линия, трансформатор, генератор и нагрузка представляются в виде своего собственного агента, имеющего вполне конкретные внутренние характеристики объекта (например активное и реактивное сопротивление для ЛЭП), а также контролирующего замещаемый объект по ряду параметров (напряжение, передаваемая мощность, потери и т.д.). Во-вторых, вся сеть строится из агентов этих элементов, при этом взаимодействовать могут только взаимосвязанные элементы, т.е. элементы непосредственно связанные друг с другом; таким образом исключается чрезмерное усложнение путей коммуникации между агентами [2].

При возникновении аварии и отключении/выходе из строя элемента сети, агент этого элемента сообщает соседним агентам о потере питания на данном участке, тем самым запуская процесс поиска альтернативного пути подачи электроэнергии потребителю.

Если линия является тупиковой, то альтернативного пути просто не существует и, как и в первом случае, потребитель остается без питания. Если параллельно вышедшей из строя линии имеются еще линии, питающие потребителя, то нагрузка с помощью агента шин равномерно перераспределяется на оставшиеся линии и при изменившихся параметрах агентами линий происходит перерасчет потерь мощности в новом режиме и перерасчет падений напряжения.

Если параллельная линия находилась в отключенном состоянии, то агент шин переключает всю нагрузку на указанную линию, а агент этой линии пересчитывает значения потерь мощности и напряжения в соответствии с внутренними параметрами этой линии (при эквивалентности этих линий режим практически не меняется).

Указанный способ является наиболее простым и понятным, а также не требующим составления и перерасчета всей схемы сети из-за локального характера аварии и возникающей при этом задачи [3].

Однако наиболее сложным моментом является отключение одной из двух независимых друг от друга линий электропередач (при кольцевой или многоконтурной схеме питания потребителя), так как при этом требуется полный пересчет нового режима. Рассмотрим более подробно аварию такого рода.

Схема сети представлена на рис. Она состоит из семи линий электропередач ( $W1-W7$ ), трех подстанций (П/ст 1-П/ст 3), трех станций разного типа (ТЭЦ, АЭС и ГЭС), семи трансформаторов и пяти потребителей. Предполагается, что авария произошла на линии  $W5$  и при этом она отключилась.

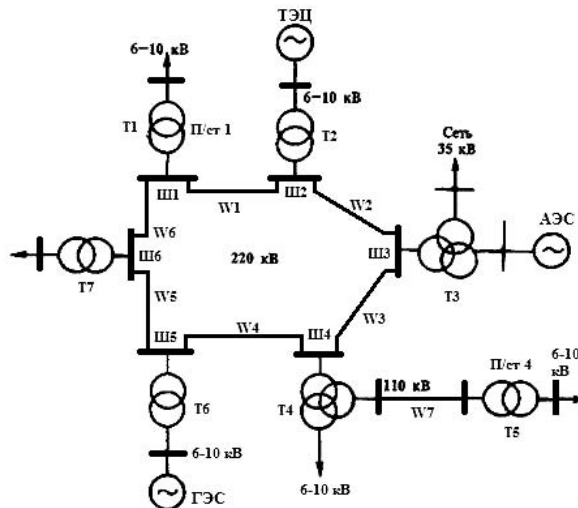


Рис. Принципиальная схема сети

При любой аварии, как уже указывалось выше, агент поврежденного элемента посылает уведомительные письма ближайшим агентам (в данном случае агент линии  $W5$  посылает 2 сообщения агенту шин ВН Ш6 П/ст 3 и агенту шин ВН Ш5 трансформатора Т6). В свою очередь агент шин Ш5, получая данные об отказе линии  $W5$  и передаваемой по ней мощности, делает запрос о возможности передачи этой мощности по линии  $W4$ . Агент линии  $W4$  просчитывает эту возможность с учетом пропускной способности линии. Здесь возможны три варианта: линия может пропустить указанную мощность либо часть мощности или же не может осуществить передачу мощности вообще по причине загрузки (все варианты зависят от графика загрузки линии).

Наиболее неблагоприятный вариант – если линия не может передать указанную мощность, следовательно, часть потребителей, питавшихся от ГЭС, будет полностью отключена. О чем сообщит агент шин Ш5, как только получит соответствующее уведомление; при этом ГЭС будет разгружена на величину указанной мощности, а потребителю будет постепенно восстановлено питание за счет других станций.

Более приемлемый вариант – если линия  $W4$  может передать какую-то часть электроэнергии, тогда агент шин Ш5 даст команду разгрузить ГЭС (и, соответственно, трансформатор Т6) на величину мощности, которую невозможно передать (при этом произойдет перерасчет потерь мощности в трансформаторе его агентом), и переключит остальную мощность на линию  $W4$ .

Далее агент шин Ш4, получая дополнительную мощность с линии  $W4$  за вычетом потерь в ней, постарается сохранить баланс мощности на собственных шинах и уменьшит

мощность, получаемую от АЭС по линии W3 на величину, поступающую по W4. При этом агент линии W3 произведет пересчет потерь мощности и падения напряжения.

Избыточная мощность, ранее передававшаяся по линии W3, агентом шин Ш3 будет переброшена на линию W2, если она сможет ее передать.

Параллельно с этим агент шин Ш6 сделает запрос о возможности передачи по линии W6 мощности, которая ранее протекала по линии W5. И вновь возникает три варианта: мощность возможно передать, мощность возможно передать частично и мощность невозможно передать.

Если мощность невозможно передать, то агент линии отправляет ответное сообщение, получив которое агент шин Ш6 отключает часть потребителей на время ремонта линии W5 и сообщает об этом агенту Ш5 посредством агента линии W5. Тогда агент Ш5 меняет изначальную стратегию поведения и дает команду разгрузки ГЭС. Агент трансформатора Т6 пересчитывает режим работы трансформатора. Алгоритм заканчивается.

Если же по линии W6 возможно передать часть электроэнергии, тогда ее агент сообщает об этом агенту шин Ш6 и посылает запрос агенту шин Ш1, который пересылает запрос агенту линии W1. Агент шин Ш1 не посылает запрос агенту трансформатора Т1 из-за того, что П/ст1 является понизительной, то есть на стороне низкого напряжения нет генерирующих объектов и вся мощность поступает по линии W1.

Агент линии W1 в свою очередь также может дать три варианта ответа: есть возможность передачи, есть возможность частичной передачи и нет возможности передачи. Если нет возможности передачи, то, как и в предыдущем случае с линией W6, агент линии сообщает об этом агенту шин Ш6 и алгоритм завершается.

Если возможность передачи частична, то мощность, проходящая через линию W6, уменьшается до величины, которую может пропустить линия W1 с учетом потерь в самой линии. И таким образом агент линии W1 сначала просчитывает потери и падение напряжения своей линии и передает соответствующие значения агенту шин Ш1, а тот передает их агенту линии W6, затем агент линии W6 пересчитывает свои потери мощности и падения напряжения.

После чего агент линии W1 отправляет запрос агенту шин Ш2. Этот агент отправляет запрос агенту трансформатора Т2 о возможности передачи указанной мощности и одновременно отправляет такой же запрос агенту линии W3.

Агент Т1 может дать такие же ответы, как и любой агент линии электропередач (возможность есть, есть частичная возможность и нет возможности). Если возможности нет, то об этом уведомляется агент шин Ш2. Если возможность имеется, то в зависимости от того, какую мощность можно передать, агентом Т1 формируется новый запрос агенту ТЭЦ. А агент ТЭЦ формирует ответ в зависимости от имеющейся резервной мощности и условий инерционности агрегатов (котлов, турбин и т.д.) и отсылает его через агента Т2 агенту шин Ш2.

Второй запрос, отправленный агентом шин Ш2 агенту линии W2, проверяет возможности линии W2. При отказе информация поступает к агенту шин Ш2, а затем вся информация, полученная агентом Ш2, включая возможность получения питания от ТЭЦ с учетом различных параметров, поступает агенту шин Ш6 по цепочке: W2-Ш2-W1-Ш1-W6-Ш6. Агент шин Ш6 отключает часть нагрузки и сообщает агенту ТЭЦ о необходимости выработки дополнительной мощности, а затем по мере набора мощности подключает нагрузку.

При возможности частичной передачи мощности по линии W2 эта величина сравнивается с требуемой и, если необходимо, накладывается очередное ограничение и происходит пересчет потерь и падений напряжения в линиях W2, W1 и W6 соответствующими агентами.

Далее запрос поступает от агента линии W2 агенту шин Ш3, который уже имеет избыток некоторой мощности на своих шинах. Агент шин Ш3 сравнивает значения

избытка мощности и требуемой величины мощности и при необходимости подает запрос агенту АЭС об уменьшении мощности.

Таким образом избыточная электроэнергия с шин ШЗ по линии W2, с учетом ее пропускной способности, потерь мощности и падения напряжения поступает на шины Ш2, далее по линии W1 с теми же условиями на шины Ш1 и, наконец, по линии W6 на шины Ш6, которые и требовалось запитать.

При этом необходимо учитывать, что при передаче электроэнергии на дальние расстояния (передача электроэнергии от АЭС по линиям W2, W1 и W6) возможно значительное падение напряжения на шинах Ш6 [4]. Для устранения этого недостатка агенты соответствующих линий после расчета падений напряжения на своем участке могут подать сигнал на компенсацию реактивной мощности ближайшим агентам компенсирующих устройств (на схеме не указаны).

Но даже при этом вновь установившийся режим не будет оптимальным, а также не все потребители будут обеспечены электроэнергией. То есть данный алгоритм позволит экстренно восстановить питание некоторой части потребителей, однако в дальнейшем потребует корректировки установившегося режима.

### **Литература**

1. Nagata T. A multi-agent approach to power system restoration / T.Nagata, H.Sasaki // IEEE transactions on Power Systems. – 2002. – Vol.17, № 2.
2. Pipattanasomporn M. Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation / M.Pipattanasomporn, H.Feroze, S.Rahman // Proc. IEEE PES 2009 Power Systems Conference and Exposition (PSCE'09), Mar 2009, Seattle.
3. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям / В.Б.Тарасов. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
4. Камаев В.А. Интеллектуальные системы автоматизации управления энергосбережением / В.А.Камаев, М.В.Щербаков, А.Бребельс // Открытое образование. – 2011. – № 2. – С. 227-231.

### **Сведения об авторах**

#### **Кубарьков Юрий Петрович**

доцент Самарского государственного технического университета,  
кандидат технических наук  
Россия, 443100, г.Самара, ул.Молодогвардейская, д.244  
тел. 8-(846)-242-37-89; эл. почта: tsara.cuba@yandex.ru

#### **Рыгалов Алексей Юрьевич**

ассистент Самарского государственного технического университета,  
Россия, 443100, г.Самара, ул.Молодогвардейская, д.244  
тел. 8-(846)-242-37-89

#### **Макаров Ярослав Викторович**

инженер Самарского государственного технического университета,  
Россия, 443100, г.Самара, ул.Молодогвардейская, д.244  
тел. 8-(846)-242-37-89

#### **Карпов Алексей Сергеевич**

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

УДК 622.311.1:658.26

**А.С.Карпов, В.В.Ярошевич, О.М.Карпова**

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОНИТОРИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ГОСТ 13109-97 В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ 6-150 КВ**

### **Аннотация**

Приведены результаты длительных исследований на действующих высоковольтных подстанциях Мурманской и Архангельской областей. Показаны основные проблемы высоковольтной сети по нормоконтролю напряжения на основе анализа показателей качества электроэнергии (ПКЭ). Систематизированы существующие методы определения источников искажения качества электроэнергии.

### **Ключевые слова:**

*распределительная электрическая сеть, качество электроэнергии, измерения в действующей высоковольтной сети, локализация источников искажения, электромагнитная совместимость.*

**A.S.Karpov, V.V.Yaroshevich, O.M.Karpova**

## **ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF MONITORING RESEARCHES ON ELECTRIC POWER QUALITY IN ACCORDANCE WITH GOST 13109-97 IN THE 6-150 KV HIGH-VOLTAGE NETWORK**

### **Abstract**

Results of long-term researches in operating high-voltage substations of the Murmansk and Arkhangelsk regions are given. Main high-voltage network problems with electric tension normal inspection are shown based on the analysis of electric power quality indicators. The existing methods of determination of sources of electric power quality distortion are systematized.

### **Keywords:**

*distributive electric network, electric power quality, measurements in operating high-voltage network, distortion sources localization, electromagnetic compatibility.*

В последнее десятилетие произведена крупная организационно-правовая модернизация системы электроэнергетики России, введен целый ряд нормативных документов (МЭК, ГОСТ) и законопроектов [1-4], касающихся качества электроэнергии с точки зрения нормативно-правовых взаимоотношений поставщиков и приемников электроэнергии, а так же методов и средств измерений ПКЭ. Но основополагающим нормативным документом стал ГОСТ Р 54149-2010 [5], действующий с 2013 г. Его введение – это своевременные и обоснованные меры, с учетом того что в 2010 г. в ЕС введен европейский стандарт для норм качества электроэнергии [6]. Однако приказом № 565-ст от 25.10.12 Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии [7] срок действия старого ГОСТ 13109-97 [8] продлен до 1 июля 2014 г., что вносит некоторую неопределенность работы нормативной базы в целом. Тем не менее, приказ № 565-ст необходим для адаптации регистраторов качества электроэнергии к новому ГОСТу [5] и дальнейшей сертификации.

В более раннем стандарте [9] даны определения показателей качества электроэнергии, а в [8] установлены значения этих показателей в точках подключения потребителей электроэнергии. Контроль показателей качества электроэнергии (ПКЭ) предусмотрен с целью периодического контроля качества электроэнергии, а также при проведении энергоаудита предприятий.

Исследование качества электрической энергии предполагает выполнение следующих этапов:

- разработка и согласование программы регистраций;
- регистрации в режиме мониторинга;
- включение и переключение приборной техники;
- обработка результатов регистраций;

- анализ и проведение контрольных регистраций.

С 2007 г. лабораторией надежности и эффективности оборудования энергосистем № 31 ЦФТПЭС КНЦ РАН выполнена серия работ по регистрации качества электроэнергии и выявлению источников искажений. Проведены регистрации в схемах электроснабжения промышленных предприятий и населения г.Северодвинск (Архангельская обл.), г.Ковдор и Ревдинского района (Мурманской обл.), а также в распределительной сети Кольского научного центра КНЦ РАН при проведении энергоаудита (табл.1). Общая длительность регистраций составила более 2500 ч.

Таблица 1

Данные об опыте мониторинговых регистраций показателей качества электроэнергии

Место измерений	Задачи измерений	Число часов регистраций
Г.Ковдор 150/110/35/6 кВ	Контроль ПКЭ на шинах подстанции	650
Г.Северодвинск 110/10 кВ	Определение источника искажений	180
	Выдача предложений по снижению искажений	
	Исследование влияния нагрузок	
	Выявление причины повышенного износа силовых трансформаторов	
ПГТ.Ревда 110/35/6 кВ, с.Ловозеро 35/10 кВ	Выдача предложения по ограничению опасных электромагнитных воздействий	600
	Контроль ПКЭ	600
Распределительная сеть 10 кВ КНЦ РАН	Обследование нагрузки потребителей, подключенных к подстанциям ПС-33 и ПС-361	480
	Определение вариантов ее перераспределения	
	Энергоаудит организации	

Для контроля показателей качества электроэнергии использовались сертифицированные средства измерения, регистраторы напряжения и тока «Парма РК6.05» и «Парма РК3.01». Результаты регистраций в обобщенном виде приведены в табл.2.

Согласно результатам, приведенным в табл.2, практически во всех сетях присутствуют показатели электроэнергии, не соответствующие нормативу. Отмечено, что постоянно присутствуют искажения установившегося напряжения и синусоидальности. В Ревде, Ковдоре, Ловозере и в сети КНЦ РАН нарушения ПКЭ систематически превышают нормально допустимый уровень.

Таблица 2

Обобщение опыта регистраций ПКЭ

Вид зарегистрированного искажения	г.Ковдор	г.Северодвинск	г.Ревда	с.Ловозеро	ТТКНЦРАН г.Апатиты
Отклонение напряжения $\delta U_y$ (установившееся отклонение)	Н/с*	Н/с	Н/с	Н/с	Н/с
$U_{1(1)}$ (по прямой последовательности)	Н/с	Н/с	Н/с	Н/с	Н/с
Несинусоидальность напряжения $K_U$ (к-т несинусоидальности)	Н/с	Норма	Н/с	Н/с	Норма
$K_{U(n)}$ (к-т гармоник)	Н/с	Н/с	Н/с	Н/с	Н/с
Несимметрия напряжения $K_{2U_b}$ (по обратной последовательности)	Норма	Норма	Норма	Норма	Норма
$K_{0U}$ (по нулевой последовательности)	Н/с	Норма	Н/с	Н/с	Н/с
Отклонение частоты $\Delta f$	Норма	Норма	Норма	Норма	Норма

\* Н/с – не соответствует норме (превышение нормально допустимого уровня более 5% времени измерения или предельно допустимого уровня).

Кроме того, выполненные регистрации в ОАО «Архэнерго» выявили, что при относительно небольших отклонениях ПКЭ по напряжению возможны опасные токовые воздействия, повышающие износ силового оборудования, в том числе ударные изменения силы тока, а также изменения частоты и синусоидальности тока.

Регистрация ПКЭ предполагает определение наличия или отсутствия искажения напряжения на системе шин. Однако разные потребители электроэнергии, подключенные к одной системе шин, могут по-разному влиять на качество электроэнергии в целом. С одной стороны, потребитель может вносить существенные искажения напряжения, тем самым ухудшая качество электроэнергии. С другой стороны, потребитель благодаря характеру подключаемой нагрузки может компенсировать искажения, вносимые другими потребителями. С учетом того что оба потребителя могут быть подключены к одной системе шин параллельно, регистрация напряжения не позволяет определить, от какого именно подключения исходят искажения. Поэтому требуются регистрации токов на каждом подключении в отдельности.

Обобщение и анализ опыта исследований ПКЭ в схемах электроснабжения промышленных предприятий и населения г.Архангельск и Мурманской обл. позволили выявить следующее.

1. Проблема качества является актуальной для распределительной сети 6-35 кВ, а также 0.4 кВ в связи с длительным отсутствием контроля за качеством электроэнергии и ограниченностью средств защиты от искажающих факторов.

2. Контроль ПКЭ по напряжению не дает подробной информации об источниках искажений качества электроэнергии.

3. Значительные трудности возникают при выявлении источников искажений напряжения. Невозможность синхронизированной регистрации напряжения на секции и всех токов на каждом подключении к исследуемой системе шин. Поэтому при определении источника искажений требуется большой объем сопоставительных измерений.

Задачи, поставленные в технических заданиях выполненных исследований, результаты исследования и публикации в данной области показывают, что часто возникают проблемы во взаимоотношениях между электроснабжающей организацией и потребителями электрической энергии. В основном требования к обеспечению электроэнергией надлежащего качества предъявляются к энергоснабжающей организации. Взаимоотношения между электроснабжающей организацией и потребителями регулируются договорами на поставку электроэнергии.

Поскольку в большинстве случаев источником искажения является специфическая нагрузка отдельных потребителей, необходимо выполнение следующих задач:

- периодический контроль показателей качества электроэнергии в точках общего подключения потребителей;
- локализация неизвестного источника(-ов) искажений;
- получение доказательной базы для юридических разбирательств.

При большом числе потребителей, подключенных к точке общего подключения, и искажающей нагрузке у части потребителей возникает проблема формирования финансовых отношений между потребителями и поставщиками электроэнергии. Решение этой проблемы предполагает формирование механизма определения неустоек за искажающее действие и компенсации за потребление некачественной электроэнергии.

Перечисленные проблемы формируют новые требования к разработке методов определения источников искажения качества электроэнергии и степени участия всех потребителей и электроснабжающей организации в ухудшении и улучшении качества электроэнергии. Частично они реализованы в [10], но имеют ряд допущений и недостатков.



Существующие методы локализации источника искажений в порядке их возникновения представлены в табл.3. Указанные методы формировались в соответствии с развитием приборной техники и возможностью проведения регистраций как в кратковременных, так и в длительных режимах.

Таблица 3

Обзор существующих методов определения источника ухудшения качества электроэнергии

№ метода	Характеристика метода	Допущения	Недостатки
1	Регистрации с отключением и включением отдельных потребителей	Неизменность параметров потребителя во время регистрации. Вклад только коммутируемого потребителя	Определение вклада только отдельного потребителя при постоянных нарушениях ПКЭ
2	Регистрации фазы между током и напряжением гармоник. Интерпретация регистраций по фазе для определения искажающей нагрузки	Зависимость фазы тока искажения в подключении только от нагрузки. Неучет влияния нагрузки других подключений на фазу напряжения	Определение вклада только отдельного потребителя. При большом числе подключений возможна ошибка определения искажающей нагрузки
3	Регистрация тока и напряжения. Определение искажающих параметров, мощности искажений и их полярности	Наличие одного источника искажения. Зависимость фазы тока искажения в подключении только от нагрузки. Мощность нагрузки и напряжение искажения не зависимы	Определение вклада только отдельного потребителя. Проблема определения генерирует или демпфирует искажения потребителя
4	Регистрации на шинах потребителя. Расчет сопротивления неискажающей нагрузки, тока искажений и доли каждого потребителя в ухудшении ПКЭ	Изменение параметров нагрузки в течение регистраций	Не определяется вклад неискажающих нагрузок в уменьшение искажений и параметры нагрузок
5	Регистрация тока и напряжения. Расчет сопротивлений искажающих нагрузок. Определение доли каждой нагрузки в искажении. Расчет неустойки и компенсации	Ухудшения качества электроэнергии возникает от искажающих токов потребителей. Распределение влияния на ПКЭ пропорционально искажающей нагрузке и мощности неискажающей нагрузки	Интерпретация результатов регистраций на неустойку и компенсацию при оплате за потребленную электроэнергию. Недоработка механизма расчетов с отсутствием баланса «неустоек» и «компенсаций»

Более подробно существующие методы описаны в статье [11]. Общим недостатком методик, приведенных в таблице, является необходимость длительных мониторинговых регистраций. Наиболее перспективным из приведенных методов является второй метод, обоснование чего приведено в [12].

В результате анализа опыта регистрации качества электроэнергии в распределительных сетях определены основные проблемы и направления дальнейших исследований в части разработки методов выявления источников искажений и интерпретации данных регистраций для оценки степени участия каждого потребителя в обеспечении качества электроэнергии и их стимулирования.

## Литература

1. ГОСТ Р 51317.4.30-2008 (МЭК 61000-4-30:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – Введ. 2010-01-01. – М., 2008. – Ч.4-30. – 122 с.
2. ГОСТ Р 51317.4.7-2008 (МЭК 61000-4-30:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. – Введ. 2010-01-01. – М., 2008. – Ч.4-7. – 122 с.
3. ГОСТ Р 53333-2008. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
4. ГОСТ Р 54149-2012. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2010-01-01. – М., 2010. – 36 с.
5. ГОСТ Р 54149-2012. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2010-01-01. – М., 2010. – 36 с.
6. EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
7. О продлении действия на территории Российской Федерации ГОСТ 13109-97: приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 октября 2012 г. № 565-ст: принят Министерством промышленности и торговли Российской Федерации. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии.
8. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (взамен ГОСТ 13109-87). – Введ. 1999-01-01. – М., 1998.
9. ГОСТ 23875-88. Качество электрической энергии. Термины и определения.
10. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: РД 153-34.0-15.502-2002. – Введ. 2003-05-01. – М., 2003. – 24 с.
11. Тигунцев С.Г. О вкладе потребителя в качество электрической энергии / С.Г.Тигунцев, И.И.Луцкий // Энергетика и промышленность России. – 2007. – № 3.
12. Ярошевич В.В. Проблемы локализации источников искажений электроэнергии и определение вклада подключенных потребителей в искажение или нормализацию качества электроэнергии / В.В.Ярошевич, Ю.М.Невретдинов, А.С.Карпов // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. Вып.1. – Апатиты, 2010. – № 1. – 180 с.

## Сведения об авторах

### **Карпов Алексей Сергеевич**

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

### **Ярошевич Вера Васильевна**

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

### **Карпова Ольга Михайловна**

учитель физики Муниципального бюджетного образовательного учреждения СОШ № 10  
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, ул.Строителей д.97  
эл. почта: evge8@mail.ru

УДК 621.311.1:658.26

**Е.С.Бабарыгина, А.Е.Веселов, Е.А.Токарева, Г.П.Фастий**

### **РАЗРАБОТКА МАЛОЗАТРАТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6 И 0.4 кВ ОАО «АПАТИТ»**

#### **Аннотация**

Предложена методика энергосберегающего регулирования напряжения в распределительных электрических сетях одного из предприятий Мурманской обл. Выполнены расчеты с использованием энергосберегающего алгоритма для одной из подстанций предприятия. Определен годовой экономический эффект от реализации предлагаемых малозатратных мероприятий. Сформулированы направления реализации намеченной программы экономии электроэнергии.

#### **Ключевые слова:**

*электропотребление, экономия электроэнергии, уровни напряжений, экономический эффект, снижение платы за электроэнергию.*

**E.S.Babarigina, A.E.Veselov, E.A.Tokareva, G.P.Fastiy**

### **DEVELOPMENT OF LOW-COST TECHNICAL MEASURES OF ELECTRIC POWER ECONOMY IN THE DISTRIBUTIVE 6 AND 0.4 KV NETWORKS OF APATIT JSC**

#### **Abstract**

A technique of energy saving regulation of tension in distributive electric networks is offered for one of the enterprises of the Murmansk region. Calculations for one of the enterprise's substations have been made by applying energy saving algorithm. Annual economic effect of the offered low-cost actions realization is defined. Directions of implementation of the planned program of electric power economy are formulated.

#### **Key words**

*power consumption, electric power economy, levels of tension, economic effect, reduction in electricity payment.*

В настоящее время в связи с резким увеличением платы за потребляемую электроэнергию особую актуальность приобретает проблема мобилизации всех имеющихся на промышленных предприятиях технических мероприятий по энергосбережению, в первую очередь малозатратных. Практическое внедрение подобных мероприятий требует проведения всесторонних исследований и расчетов, которые, как правило, не могут быть выполнены силами только энергослужб предприятий.

Важным направлением в совершенствовании режимов функционирования систем электроснабжения промышленных предприятий является рассмотрение вопроса о возможном снижении электропотребления посредством оптимизации режимов напряжения в распределительных сетях 6, 10 и 0.4 кВ.

Рационализация режимов напряжения на зажимах потребителей, обеспечивающая минимальное потребление активной и реактивной мощности и энергии, позволяет достичь существенного снижения платы за электроэнергию.

Предлагаемая работа рассматривает основные мероприятия по регулированию режимов электропотребления за счет оптимизации уровней напряжений в распределительных электрических сетях 6 и 0.4 кВ одной из подстанций цеха электроснабжения ОАО «Апатит» и в целом всего предприятия.

Результаты обследования системы электроснабжения одного из рудников ОАО «Апатит» показали, что имеет место существенное превышение напряжений как на стороне 150 кВ, так и в распределительных сетях 6 и 0.4 кВ относительно номинальных значений. Так, на секциях шин 6 кВ подстанции ПС-43, как следует из табл., уровни напряжения находятся в пределах 6.4-6.6 кВ (при номинальном напряжении  $U_{н}=6$  кВ).

Таблица

Данные замеров напряжений

Фаза	1с – 6 кВ	2с – 6 кВ	3с – 6 кВ	4с – 6 кВ
А	6.45	6.42	6.45	6.5
В	6.47	6.42	6.45	6.5
С	6.47	6.45	6.5	6.52

Основная причина сложившегося положения – чрезмерно высокие ( $U=160-165$  кВ) уровни напряжений на шинах 150 кВ Апатитской ТЭЦ, а также на шинах 150 кВ ПС-73, которая, в свою очередь, получает электроэнергию с завышенным напряжением от Кольской атомной электростанции.

Представляется целесообразным проведение разработок в направлении оптимизации режимов напряжения, при которых на зажимах электроприемников (ЭП) и шинах 6 кВ их уровни были бы близки к  $U=U_n$ . Это позволит добиться существенного снижения потребления активной и реактивной мощности (энергии) и соответственно уменьшения годовой платы за электроэнергию.

Общеизвестно [1-3], что напряжение на зажимах электроприемников оказывает влияние как на потребляемую мощность и энергию, так и на технологические параметры, определяющие производительность оборудования. Известно, что при повышении напряжения всего на 6% срок службы, например ламп накаливания, снижается вдвое, и этот факт нельзя упускать из виду, так как, например Кировский рудник, ведет подземные разработки, где на протяжении всех горизонтов идет освещение лампами накаливания.

В технической литературе [4-6] давно отмечен эффект уменьшения электропотребления при снижении уровней напряжения в сети. Однако эти возможности со стороны энергослужб предприятий упускаются.

В настоящей работе предложен энергосберегающий алгоритм регулирования электропотребления, суть которого состоит в снижении потребляемой предприятием мощности из сети энергосистемы при снижении напряжений до уровней, близких к номинальным.

Применение энергосберегающего алгоритма позволяет также сделать оценку ожидаемых экономических эффектов от перехода к режимам с рациональными уровнями напряжений.

Расчет электрических режимов распределительных сетей с учетом зависимостей мощности различных ЭП от напряжения в точках их питания и технических возможностей имеющихся средств регулирования напряжения следует производить на базе использования статических характеристик нагрузки (СХН) [7, 8].

Они представляют собой зависимости потребления активной  $P_{\dot{Y}i}$  и реактивной  $Q_{\dot{Y}i}$  мощности от напряжения на зажимах ЭП и в общем случае могут быть аппроксимированы квадратичными формулами вида:

$$P_{\dot{Y}i}(U) = P_{\dot{Y}i} \cdot \left[ \dot{a}_0 + \dot{a}_1 \cdot \frac{U}{U_0} + \dot{a}_2 \cdot \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 \right], \quad (1)$$

$$Q_{\dot{Y}i}(U) = Q_{\dot{Y}i} \cdot \left[ b_0 + b_1 \cdot \frac{U}{U_0} + b_2 \cdot \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 \right],$$

где индекс «0» выражает принадлежность к одному и тому же исходному режиму, для которого и определяются постоянные коэффициенты  $\dot{a}_0, \dot{a}_1, \dot{a}_2, b_0, b_1, b_2$ , входящие в эту зависимость. В технической литературе [9, 10] можно найти значения

этих коэффициентов для некоторых типов ЭП. В качестве исходного режима чаще всего принимается номинальный ( $U_0 = U_{\dot{Y}\dot{I}m}$  ;  $D_{\dot{Y}\dot{I}0} = D_{\dot{Y}\dot{I}m}$  ;  $Q_{\dot{Y}\dot{I}0} = Q_{\dot{Y}\dot{I}m}$  ).

Выражение (1) можно несколько преобразовать, рассматривая не полное фактическое напряжение  $U$ , а его отличие от напряжения в исходном режиме  $\Delta U = U - U_0$ .

Значительно удобнее также использовать «спрямленные» линеаризованные зависимости, которые получаются при пренебрежении членами второго порядка малости  $(U/U_0)^2$  из выражения (1):

$$\begin{aligned} P_{\dot{Y}\dot{I}}(U) &= P_{\dot{Y}\dot{I}0} \cdot \left[ 1 + K_{PU} \cdot \frac{\Delta U}{U_0} \right] = P_{\dot{Y}\dot{I}0} \cdot \left[ (1 - K_{PU}) + K_{PU} \cdot \frac{U}{U_0} \right], \\ Q_{\dot{Y}\dot{I}}(U) &= Q_{\dot{Y}\dot{I}0} \cdot \left[ 1 + K_{QU} \cdot \frac{\Delta U}{U_0} \right] = Q_{\dot{Y}\dot{I}0} \cdot \left[ (1 - K_{QU}) + K_{QU} \cdot \frac{U}{U_0} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $K_{PU}$  и  $K_{QU}$  – регулирующие эффекты активной и реактивной мощности нагрузки по напряжению:

$$\begin{aligned} K_{PU} &= \frac{\partial P_{\dot{Y}\dot{I}}}{\partial U} \Big/ \frac{P_{\dot{Y}\dot{I}0}}{U_0} \cong \frac{(P_{\dot{Y}\dot{I}} - P_{\dot{Y}\dot{I}0})/P_{\dot{Y}\dot{I}0}}{(U - U_0)/U_0}, \\ K_{QU} &= \frac{\partial Q_{\dot{Y}\dot{I}}}{\partial U} \Big/ \frac{Q_{\dot{Y}\dot{I}0}}{U_0} \cong \frac{(Q_{\dot{Y}\dot{I}} - Q_{\dot{Y}\dot{I}0})/Q_{\dot{Y}\dot{I}0}}{(U - U_0)/U_0}. \end{aligned} \quad (3)$$

Регулирующие эффекты  $K_{PU}$  и  $K_{QU}$  связаны с коэффициентами, входящими в выражение (1), следующими соотношениями:

$$K_{PU} = a_1 + 2 \cdot a_2, \quad K_{QU} = b_1 + 2 \cdot b_2. \quad (4)$$

При линеаризации зависимостей (1) полагаем:

$$\begin{aligned} a_0 &= 1 - K_{PU}; & a_1 &= K_{PU}; & a_2 &= 0; \\ b_0 &= 1 - K_{QU}; & b_1 &= K_{QU}; & b_2 &= 0. \end{aligned}$$

Электроприемники разного вида, подключенные к одним и тем же точкам распределительной сети, могут быть эквивалентированы зависимостью их суммарной активной и реактивной мощности от напряжения в этом узле:

$$\begin{aligned} D_{\dot{I}\dot{A}}(U) &= P_{\dot{I}\dot{A}0\Sigma} \cdot \left[ 1 + K_{PU\dot{y}\dot{e}\dot{a}} \cdot \frac{\Delta U}{U_0} \right], \\ Q_{\dot{I}\dot{A}}(U) &= Q_{\dot{I}\dot{A}0\Sigma} \cdot \left[ 1 + K_{QU\dot{y}\dot{e}\dot{a}} \cdot \frac{\Delta U}{U_0} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$P_{\dot{I}\dot{A}0\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{\dot{Y}\dot{I}0i}; \quad Q_{\dot{I}\dot{A}0\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_{\dot{Y}\dot{I}0i}, \quad (6)$$

$$K_{PU\dot{y}\dot{e}\dot{a}} = \sum_{i=1}^n K_{PUi} \cdot \frac{P_{\dot{Y}\dot{I}0i}}{P_{\dot{I}\dot{A}0\Sigma}}; \quad K_{QU\dot{y}\dot{e}\dot{a}} = \sum_{i=1}^n K_{QUi} \cdot \frac{Q_{\dot{Y}\dot{I}0i}}{Q_{\dot{I}\dot{A}0\Sigma}}. \quad (7)$$

По данным [11, 12], отражающим натурные исследования регулирующих эффектов нагрузки при различных уровнях напряжения из реального диапазона ( $0.9 \cdot U_m \leq U_0 \leq 1.1 \cdot U_m$ ) и различных уровнях загрузки по мощности, значения  $K_{PU}$  для комплексной нагрузки узлов промышленных предприятий колеблются в пределах  $K_{PU} = 0.3 \div 1.5$ . Что касается регулирующих эффектов  $K_{QU}$ , то разброс в их значениях значительно больше.

Необходимо заметить, что, если ЭП подключен к общим шинам с напряжением  $U$  через эквивалентное сопротивление  $Z_{\dot{Y}_i} = R_{\dot{Y}_i} + j \cdot X_{\dot{Y}_i}$  (например кабельная линия, понижающий трансформатор 6/0.4 кВ и т.д.), то на регулирующий эффект данного ЭП по напряжению на общих шинах могут оказывать заметное влияние потери мощности на этом сопротивлении.

Для успешного решения предприятием задачи поддержания напряжения на уровне желаемых величин необходимо знать данные: о схеме и параметрах питающей сети; суточных и, если нужно, сезонных изменениях нагрузки предприятия; фактических величинах напряжения на шинах трансформатора со стороны системы и со стороны нагрузки, данные о суточных изменениях напряжения и величины желаемых напряжений. Известно, что каждое изменение нагрузки немедленно отражается на величине напряжений: так, в часы максимальной нагрузки напряжение может оказаться недопустимо высоким. Современные схемы питания потребителей, как правило, предусматривают наличие нескольких ступеней трансформации напряжения, а сами электрические сети редко бывают радиальными. Наличие многочисленных потребителей, питающихся от одной и той же сети, приводит иногда к тому, что качество электрической энергии по напряжению зависит как от самого потребителя, так и от режима работы смежных предприятий, питающихся от той же линии. Ставя перед собой задачу регулирования напряжения при его ступенчатом изменении в ту или другую сторону, не следует упускать из виду, что в сетях, связанных через трансформаторы, режим поддержания напряжения в сети низкого напряжения можно, а иногда и более целесообразно, осуществлять регулировочными мероприятиями на стороне более высокого напряжения. Следует, однако, иметь в виду, что по мере удаления от точки, в которой непосредственно должно быть отрегулировано напряжение, эффективность регулирующих средств уменьшается, а также возникают трудности одновременного удовлетворения требований различных потребителей или приемников, питающихся от данной сети.

Нагрузка меняется не только в течение суток, но и в течение всего года. Например, наибольшая нагрузка в течение года – это нагрузка в осенне-зимний период, а наименьшая – в летний. Поэтому регулирование напряжения требуется не только в зависимости от суточных, но и от сезонных изменений нагрузки в течение года.

Значительное время суток величины напряжений на (3÷5)% превышают номинальные значения, что технически допустимо, но экономически расточительно. Действительно, ГОСТ [13] допускает следующие уровни напряжения на зажимах электроприемников общего назначения:  $0.95 \cdot U_m \leq U \leq 1.05 \cdot U_m$ .

Таким образом, если считать, например, что регулирующий эффект активной мощности ЭП по напряжению  $K_{PU}=0.3$ , то получается, что уровни напряжения  $U = (1.03 \div 1.05) \cdot U_m$  приводят к повышенному потреблению активной мощности (энергии) на 1÷1.5% от потребления при номинальном уровне напряжения. И наоборот, принудительное поддержание напряжения на минимальном рабочем уровне  $0.95 U_{ном}$  дает возможность снизить активное энергопотребление на 1.5% по сравнению с номинальным или на 2.5÷3% по сравнению с потреблением при повышенном напряжении.

Возможность снижения потребления активной и реактивной мощности ( $P$ ,  $Q$ ) и энергии ( $W_p$ ,  $W_Q$ ) из питающей сети за счет поддержания пониженных уровней напряжения в сети предприятия также должна заинтересовать энергослужбы потребителей. Одним из средств, влияющих, с одной стороны, на уровни напряжения, а с другой – на потери в сетях, являются компенсирующие устройства реактивной мощности нагрузок.

Реакцию потребителей на отклонения напряжения хорошо можно изучить при использовании статических характеристик нагрузок (СХН), т.е.  $P = f(U, \omega)$ ,  $Q = f(U, \omega)$ . СХН в целом получаются как сумма соответствующих характеристик всех потребителей с учетом потерь в распределительной сети, входящей в узел нагрузки.

Продемонстрируем применение энергосберегающего алгоритма на примере одного из рудников ОАО «Апатит», получающего питание от подстанции ПС-43.

Потребление электроэнергии за один из месяцев, например за март, на стороне 6 кВ, по данным ЕЭСК Центра, составило:

Т-1, ячейка 19: 2 888 230 кВт·ч,

Т-1, ячейка 26: 2 765 910 кВт·ч,

Т-2, ячейка 36: 4 037 060 кВт·ч,

Т-2, ячейка 41: 5 033 940 кВт·ч.

В сумме за месяц потребление на стороне 6 кВ составило:  $\Delta W_p = 14\,725\,140$  кВт·ч.

Средневзвешенное значение активной мощности нагрузки на стороне 6 кВ составляет:

$$D_{\text{нб}} = \frac{\Delta W_p}{N_{\text{дней}} / \text{год}} = \frac{14725140}{24 \cdot 31} \cong 20 \text{ кВт}.$$

Примем  $\cos \varphi = 0.9$ , соответственно  $\text{tg} \varphi \cong 0.5$ . В результате реактивная мощность определяется:  $Q_{\text{нб}} = D_{\text{нб}} \cdot \text{tg} \varphi \cong 20 \cdot 0.5 = 10 \text{ кВт}.$

Таким образом, можно принять для исследования эквивалентную схему питания (рис.), в которой на шинах 6 кВ ПС-43 подключена нагрузка общей номинальной мощностью  $P_{\text{нб}} + j \cdot Q_{\text{нб}} = (20 + j \cdot 10) \text{ кВт}.$

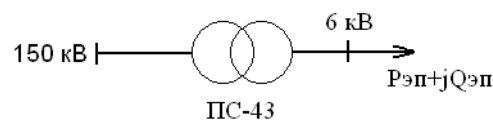


Рис. Эквивалентная схема питания

В составе нагрузки учтены типовые общепромышленные потребители, например:

1) 50% составляет асинхронная нагрузка суммарной номинальной мощностью  $P_{\text{нб}} + j \cdot Q_{\text{нб}} = (10 + j5) \text{ кВт}.$  Регулирующие эффекты:  $K_{pU} = 0$ ;  $K_{QU} = 3.0$ .

2) 20% составляет активная нагрузка (печи, освещение, термическая нагрузка) суммарной номинальной мощностью  $P_{\text{ном}} = 4 \text{ МВт}.$  Регулирующие эффекты:  $K_{pU} = 20$ ;  $K_{QU} = 0$ .

3) 30% составляет обобщенная низковольтная нагрузка мощностью  $P_{\text{нб}} + j \cdot Q_{\text{нб}} = (6 + j \cdot 5) \text{ кВт}.$  Регулирующие эффекты:  $K_{pU} = 0.78$ ;  $K_{QU} = 3.0$ .

Следует отметить, что представление нагрузки в виде укрупненных групп (асинхронная, активная, обобщенная и т.д.) выполняется обычно на стадии предварительного обследования рассматриваемых систем электроснабжения совместно с энергетическими службами. В настоящей работе использованы результаты эквивалентирования по материалам ЦФТПЭС.

Значения  $K_{PU}$  и  $K_{QU}$  принимаются по литературным и справочным данным, а также по результатам экспериментальных исследований.

Известно, что на шинах 6 кВ ПС-43 в часы максимума поддерживается напряжение  $U=6.5$  кВ. Оценим возможный экономический эффект от снижения потребления активной и реактивной мощностей нагрузки при снижении напряжения до уровня номинального значения 6 кВ.

Введем условные обозначения. В качестве режима № 1 примем исходный режим, отвечающий повышенному относительно номинального напряжению  $U = 1.08 \cdot U_{\text{н}} \approx 6.5$  В.

В качестве режима № 2 рассмотрим режим, отвечающий номинальному напряжению  $U = U_{\text{н}} = 6$  В с номинальной мощностью нагрузки  $S_{\text{н}} = (20 + j \cdot 10)$  ВА.

Мощность нагрузки в первом режиме определим отдельно по составу потребителей:

1) асинхронная нагрузка:

$$P_{\text{АА}}^{6.5} = D_{\text{АА}} \cdot \left[ (1 - K_{PU}) + K_{PU} \cdot \frac{U}{U_{\text{н}}} \right] = 10 \cdot [(1 - 0) + 0 \cdot 1.08] = 10.0 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{АА}}^{6.5} = Q_{\text{АА}} \cdot \left[ (1 - K_{QU}) + K_{QU} \cdot \frac{U}{U_{\text{н}}} \right] = 5 \cdot [(1 - 3) + 3 \cdot 1.08] = 6.2 \text{ кВар},$$

2) активная нагрузка:

$$P_{\text{аэб}}^{6.5} = D_{\text{аэб}} \cdot \left[ (1 - K_{PU}) + K_{PU} \cdot \frac{U}{U_{\text{н}}} \right] = 4 \cdot [(1 - 2) + 2 \cdot 1.08] = 4.64 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{аэб}}^{6.5} = 0;$$

3) обобщенная низковольтная нагрузка:

$$P_{\text{іа}}^{6.5} = D_{\text{іа}} \cdot \left[ (1 - K_{PU}) + K_{PU} \cdot \frac{U}{U_{\text{н}}} \right] = 6 \cdot [(1 - 0.78) + 0.78 \cdot 1.08] = 6.37 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{іа}}^{6.5} = Q_{\text{іа}} \cdot \left[ (1 - K_{QU}) + K_{QU} \cdot \frac{U}{U_{\text{н}}} \right] = 5 \cdot [(1 - 3) + 3 \cdot 1.08] = 6.2 \text{ кВар}.$$

Таким образом, в режиме № 1 суммарная мощность нагрузки составит:

$$D_{\text{YE}}^{6.5} + j \cdot Q_{\text{YI}}^{6.5} = (10 + 4.64 + 6.37) + j \cdot (6.2 + 0 + 6.2) = (21.01 + j \cdot 12.4) \text{ МВА}.$$



При переходе от режима № 1 к режиму № 2 с пониженным напряжением потребление мощности снизилось:

$$\Delta P_{1 \rightarrow 2} = P_1^{6.5} - P_2^{6.0} = 21.01 - 20 = 1.01 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{1 \rightarrow 2} = Q_1^{6.5} - Q_2^{6.0} = 12.4 - 10 = 2.4 \text{ кВАр}.$$

Выражая эти значения в процентном отношении к номинальным параметрам нагрузки при уменьшении напряжения на  $\Delta U=8\%$  (с 6.5 до 6.0 кВ), получаем уменьшение активной и реактивной мощности:

$$\Delta P = (1.01/20) \cdot 100\% = 5.05\%,$$

$$\Delta Q = (2.4/10) \cdot 100\% = 24.0\%.$$

Таким образом, снижение уровня напряжения приводит к снижению мощности, потребляемой из сети энергосистемы и подлежащей оплате (в среднем на 1% снижения напряжения активная мощность уменьшается на 0.63%, реактивная – на 3%).

Для оценки экономического эффекта уменьшения потребления активной и реактивной мощности с точки зрения снижения оплаты за электроэнергию была разработана экспресс-методика, позволяющая наглядно оценить эффект от внедрения энергосберегающих методов в промышленных системах электроснабжения (СЭ).

Рассмотрим наиболее простой и широко распространенный случай, когда в схеме СЭ не происходит радикальных изменений, а именно:

1) все компенсирующие устройства в рассматриваемых режимах находятся в одинаковом состоянии (либо включены, либо отключены);

2) будем учитывать только составляющие оплаты за потребленную активную и реактивную электроэнергию.

Рассмотрим 2 варианта расчета экономического эффекта:

1) при учете оплаты реактивной электроэнергии;

2) наиболее реальный случай, когда оплачивается только активная электроэнергия.

Оценим, как изменится плата за электроэнергию при снижении напряжения в питающей сети на 8%. Усредненное значение суммарной годовой платы за электроэнергию всего ОАО «Апатит»  $\dot{I}_{\Sigma}^{\text{апа}}$  может быть принято (с учетом среднепокупного тарифа в ценах на 2010 г. – 1.17 руб/кВт·ч и 0.09 руб/кВАр·ч и потребления за месяц активной нагрузки в размере 14 725 140 кВт·ч, соответственно реактивной 7 362 570 кВАр·ч):

1) с учетом платы за реактивную мощность:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\Sigma}^{\text{апа}} &= 12 \cdot (\Delta W_p \cdot 1.17 + \Delta W_q \cdot 0.09) = \\ &= 12 \cdot (14725140 \cdot 1.17 + 7362570 \cdot 0.09) = 214.6 \text{ млн руб.} \end{aligned}$$

2) без учета платы за реактивную мощность:

$$\dot{I}_{\Sigma}^{\text{апа}} = 12 \cdot \Delta W_p \cdot 1.17 = 12 \cdot 14725140 \cdot 1.17 = 206.7 \text{ млн руб.}$$

Оценим экономию платы за электроэнергию, т.е. годовой экономический эффект, при переходе от режима № 1 к режиму № 2.

$$1. \Delta \ddot{I}_{\Sigma 1 \rightarrow 2} = \Delta \ddot{I}_{w_{p1 \rightarrow 2}} + \Delta \ddot{I}_{w_{q1 \rightarrow 2}} = b_{\delta} \cdot \dot{O}_i \cdot \Delta D_{1 \rightarrow 2} + b_Q \cdot \dot{O}_i \cdot \Delta Q_{1 \rightarrow 2} = \dot{Y}_{\ddot{I} \ddot{A} \ddot{A} 1 \rightarrow 2}.$$

В этих формулах  $b_P$  – среднепокупной тариф активной мощности за март месяц:

$$b_P = 1.17 \text{ ¢/кВт} \cdot \text{ч}; b_Q = 0.09 \text{ ¢/кВ} \cdot \text{ч}.$$

Здесь принято, что тариф оплаты реактивной мощности и электроэнергии составляет 8% от активных тарифов (такой порядок расчета существовал до 1995 г., предполагается возврат к прежней схеме в ближайшие годы).

$T_M$  – число часов использования максимальных нагрузок (для трехсменных предприятий с ровным графиком нагрузки  $T_M=7000$  ч).

При снижении напряжения на 1% активная мощность уменьшается на  $K_{PV}=0.63\%$ , реактивная – на  $K_{QU}=3\%$ . Рассмотрим экономический эффект от снижения напряжения на 8%. Изменение активной и реактивной мощности в этом случае составит величину:

$$\Delta P_{1 \rightarrow 2} = K_{PV} \cdot \frac{\Delta U, \%}{100} \cdot P_M = 0.63 \cdot \frac{8}{100} \cdot 20 = 1.008 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{1 \rightarrow 2} = K_{QU} \cdot \frac{\Delta U, \%}{100} \cdot Q_M = 3 \cdot \frac{8}{100} \cdot 10 = 2.4 \text{ кВ} \cdot \text{ч},$$

где  $P_M=20$  МВт;  $Q_M=10$  Мвар – значения потребления номинальной мощности.

В результате ожидаемый экономический эффект по минимальным оценкам составит:

$$\dot{Y}_{\ddot{I} \ddot{A} \ddot{A} 1 \rightarrow 2} = 1.17 \cdot 7000 \cdot 1.008 \cdot 10^3 + 0.09 \cdot 7000 \cdot 2.4 \cdot 10^3 = 9.76 \text{ ¢} \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}.$$

Оценим годовой экономический эффект от реально возможного снижения напряжения в распределительной сети ПС-43 на 8% в процентах от суммарной платы за электроэнергию:

$$\frac{\dot{Y}_{\ddot{I} \ddot{A} \ddot{A} 1 \rightarrow 2}}{\ddot{I}_{\ddot{A} \ddot{A}}} = \frac{9.76}{214.6} \cdot 100\% = 4.6 \text{ \%}.$$

2. Теперь находим экономический эффект без реактивной мощности.

Определяется годовой эффект  $\dot{Y}_{\ddot{I} \ddot{A} \ddot{A} 1 \rightarrow 2}$ :

$$\Delta \ddot{I}_{\Sigma 1 \rightarrow 2} = \Delta \ddot{I}_{w_{p1 \rightarrow 2}} = b_{\delta} \cdot \dot{O}_i \cdot \Delta D_{1 \rightarrow 2};$$

$$\dot{Y}_{\ddot{I} \ddot{A} \ddot{A} 1 \rightarrow 2} = 1.17 \cdot 7000 \cdot 1.008 \cdot 10^3 = 8.25 \text{ ¢} \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}.$$

Оценим годовой экономический эффект от реально возможного снижения напряжения в распределительной сети завода на 8% в процентах от суммарной платы за электроэнергию:

$$\frac{\dot{Y}_{\ddot{I} \ddot{A} \ddot{A} 1 \rightarrow 2}}{\ddot{I}_{\ddot{A} \ddot{A}}} = \frac{8.25}{206.7} \cdot 100\% = 4.0 \text{ \%}.$$

Реально эффект от регулирования напряжения будет значительно больше, так как регулирующие эффекты конкретных электроприемников больше принятых в расчете цифр. На практике расчет производится следующим образом: для более точного учета нагрузки выбирается не все предприятие или цех, а небольшой его участок или отделение, где состав нагрузки известен более точно.

Расчет выполняется по вышеописанной методике. Затем определяется

удельный годовой экономический эффект на 1 МВт:

$$\dot{Y}_{\Sigma \text{AIA}}^{0\text{A}} = \frac{\dot{Y}_{\text{AIA } 1 \rightarrow 2}^{\text{idA}}}{P_{\text{M}}^{\text{idA}}} = \frac{8250}{20} = 412.5 \text{ [тыс. руб/МВт]}.$$

Зная полную мощность всего предприятия по счетчикам коммерческого учета, можно определить ожидаемый экономический эффект от снижения платы для всего предприятия  $\dot{Y}_{\Sigma \text{AIA}}^{\Sigma} = \dot{Y}_{\text{AIA } 1 \rightarrow 2}^{0\text{A}} \cdot \dot{D}_I^{\text{idA}}.$

Потребление активной электроэнергии всего предприятия за март, по данным ЕЭСК Центра, составило 146 928 013 кВт·ч.

Средневзвешенное значение активной нагрузки всего предприятия составляет:

$$\dot{D}_I^{\text{idA}} = \frac{\Delta W_p}{N_{\text{антА / ладб}}} = \frac{146\,928\,013}{24 \cdot 31} = 197.4 \text{ ладб}.$$

Ожидаемый экономический эффект от снижения платы для всего предприятия составит:

$$\dot{Y}_{\Sigma \text{AIA}}^{\Sigma} = 412.5 \cdot 197.4 = 81.43 \text{ млн руб.}$$

Оценим годовой экономический эффект от реально возможного снижения напряжения в распределительной сети предприятия в процентах от суммарной платы за электроэнергию  $\dot{I}_{\Sigma \text{AIA}}$ , которая составляет в среднем за год:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\Sigma \text{AIA}} &= \frac{\dot{I}_{\text{yaaou}} + \dot{I}_{\text{oaadaeu}} + \dot{I}_{\text{ladb}}}{3} \cdot 12 = \\ &= \frac{175976217 + 171070929 + 176533355}{3} \cdot 12 = 2.1 \text{ ладб дба.} \\ \frac{\dot{Y}_{\Sigma \text{AIA } 1 \rightarrow 2}}{\dot{I}_{\Sigma \text{AIA}}} &= \frac{81.43}{2100} \cdot 100\% = 3.9 \%. \end{aligned}$$

### Техническая реализация мероприятий по оптимизации уровней напряжения

Оптимизация уровней напряжения в распределительной сети 6, 10 и 0.4 кВ до значений, близких к номинальным, может быть достигнута в результате следующих технических малозатратных мероприятий.

1. Регулирование напряжения в головной части схемы, т.е. с помощью трансформаторов ПС-43, на которых установлены устройства РПН с широким диапазоном регулирования 154 кВ±8·1.5%. Основная трудность применения этого технического средства заключается в необходимости согласования регулирования напряжения с энергосистемой.

2. Местное регулирование напряжения с помощью понижающих трансформаторов 6/0.4 и 10/0.4 кВ, установленных в цехах предприятия. На них установлены регуляторы типа ПБВ, т.е. с отключением трансформатора от сети, с диапазоном регулирования 6 кВ±2·2.5%. Реализация этого мероприятия находится в ведении энергослужбы предприятия.

### Литература

1. Веников В.А. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах / В.А.Веников. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.
2. Маркушевич Н.С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии / Н.С.Маркушевич. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 104 с.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А.Сыромятников. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 528 с.

4. Карпов Ф.Ф. Регулирование напряжения в электрических сетях промышленных предприятий / Ф.Ф.Карпов, А.А.Солдаткина. – М.: Энергия, 1970. – 224 с.
5. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю.С.Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 176 с.
6. Кузнецов Н.М. Рациональное потребление на горных предприятиях / Н.М.Кузнецов // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 1. – С. 128-135.
7. Гуревич Ю.Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю.Е.Гуревич, Л.Е. Либова, А.А.Окин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
8. Разработка комплекса энергосберегающих мероприятий в промышленных распределительных электрических сетях напряжением 6-10 кВ / А.Е.Веселов, В.В.Ярошевич, Е.А.Токарева, Г.П.Фастий // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 1. – С. 135-149.
9. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. В 2 т. Т.1: Электрооборудование / под общ. ред. А.А.Федорова. – М.: Энергоиздат, 1986. – 568 с.
10. Согомоян С.В. Располагаемая реактивная мощность синхронного двигателя при различных режимах его работы / С.В.Согомоян // Тр. ВНИИЭ. – 1967. – Вып.30. – С. 45-47.
11. Баркан Я.Д. Автоматизация режимов по напряжению и реактивной мощности: Из опыта Латвглавэнерго / Я.Д.Баркан. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
12. Лисеев М.С. Методика обработки контрольных замеров в энергосистеме / М.С.Лисеев, А.П.Угнер. – Электричество. – 1979. – № 2. – С. 19-22.
13. ГОСТ Р 54149-2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2013-01-01.

#### ***Сведения об авторах***

##### **Бабарыгина Елена Сергеевна**

инженер электротехнического бюро отдела главного энергетика  
 ЗАО «Северо-Западная фосфорная компания»  
 Россия, 184227, Мурманская обл., пос.Коашва, д.26  
 эл. почта: BOBRIK-lenor@mail.ru

##### **Веселов Анатолий Евгеньевич**

ведущий научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии  
 Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,  
 кандидат технических наук  
 Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д.21А

##### **Токарева Евгения Александровна**

младший научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии  
 Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН  
 Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д.21А

##### **Фастий Галина Прохоровна**

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

# ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

---

УДК 620.9 (470.21)

**О.Е.Коновалова, Е.А.Иванова**

## ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОГЭС НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

### Аннотация

Дана гидрографическая и гидрологическая характеристика малых и средних рек на Кольском п-ове, приведены преимущества и предпосылки строительства микроГЭС для ряда потребителей в удаленных районах Мурманской обл., а также их технические и стоимостные показатели.

### Ключевые слова:

*гидроэнергетические ресурсы Мурманской обл., современные отечественные и зарубежные микроГЭС.*

**О.Е.Konovalova, E.A.Ivanova**

## POSSIBILITY OF USING MICRO HYDRO POWER STATIONS ON THE KOLA PENINSULA

### Abstract

Hydrographic and hydrological characteristics of small and medium-sized rivers of the Kola Peninsula are presented, advantages and prerequisites of building micro hydroelectric power stations for a number of customers in the remote areas of the Murmansk region are given as well as their technical and cost parameters.

### Keywords:

*hydropower resources of the Murmansk region, modern domestic and foreign micro hydroelectric power stations.*

Мурманская область богата гидроэнергетическими ресурсами. Здесь насчитывается более 107 тыс. озер общей площадью зеркала 8195 км<sup>2</sup>, 10 водохранилищ и около 21 тыс. рек общей протяженностью 60485 км (рис.1). Большинство рек (19597) имеют длину менее 10 км и относятся к разряду малых, они составляют 95.1% от общего числа водотоков, а их суммарная длина 61.2% от общей длины всех рек. Протяженность более 100 км на Кольском п-ове имеют всего 15 рек. Их суммарная длина составляет 4.0% от общей длины водотоков. Рек, имеющих протяженность более 200 км, в области только 4 – Иоканьга (202 км), Стрельна (213 км), Варзуга (254 км) и, самая длинная река, Поной (426 км).

Реки Кольского п-ова относятся к бассейнам Баренцева и Белого морей. Водораздел проходит с запада на восток – от государственной границы с Финляндией к Горлу Белого моря через Сальные, Хибинские, Ловозерские тундры и горную гряду Кейвы. Главные реки текут на север и на юг, в широтном направлении протекает лишь р.Понной и частично Иоканьга.

Население Мурманской области рассредоточено по территории неравномерно. Основная масса проживает в городах и поселках городского типа, вблизи железной дороги. В то же время по последней переписи населения 2010 г. в области насчитывается 112 сельских населенных пунктов, в большинстве из которых (104 н.п.) число жителей не превышает 1 тыс. чел., а в некоторых не доходит даже до сотни. Большая часть этих поселков находится на побережье Белого и Баренцева морей и в центре полуострова, в Ловозерском и Кандалакшском районах – в зонах децентрализованного электроснабжения. В табл.1 приведена численность постоянно проживающего населения в некоторых из таких поселений.

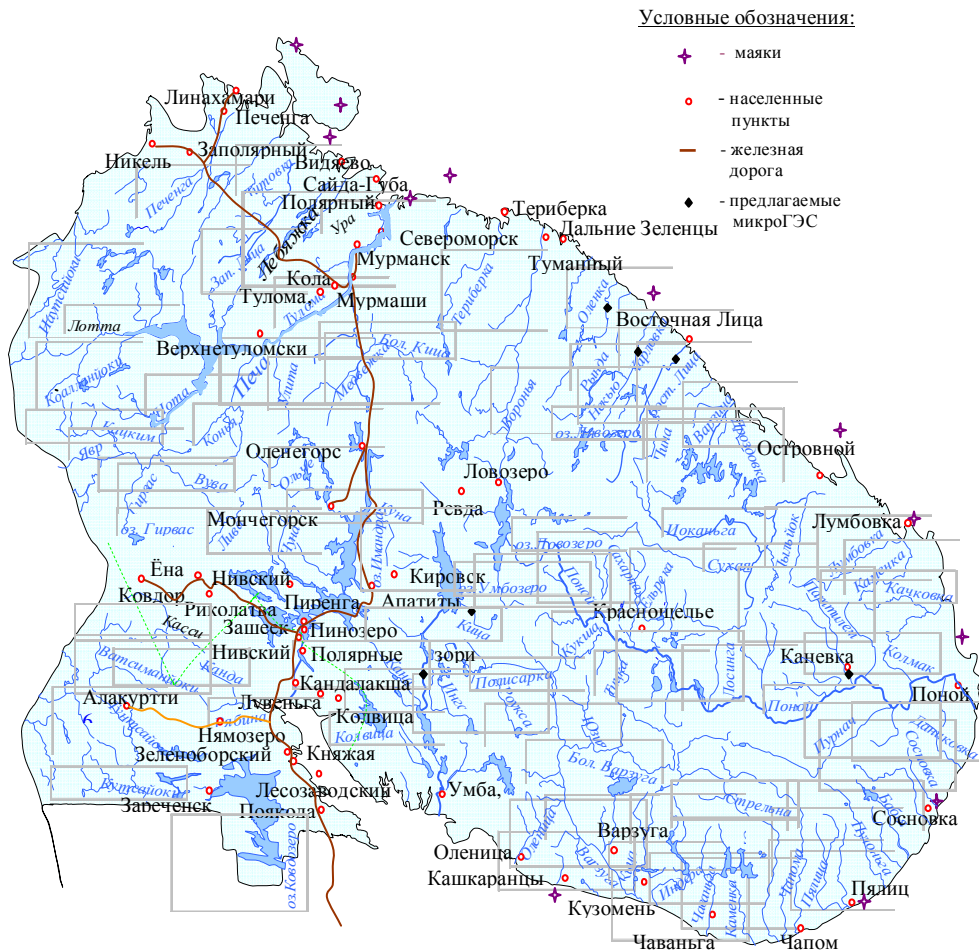


Рис.1 Схема рек Кольского п-ова

Электроснабжение большинства этих населенных пунктов осуществляется от дизельных электростанций, а теплоснабжение от котельных. Постоянный рост цен на топливо и значительная удаленность от железной дороги приводят к снижению рентабельности энергетических установок и повышению себестоимости электрической и тепловой энергии. Поэтому малая гидроэнергетика для таких поселков, куда подача электроэнергии по ЛЭП экономически невыгодна из-за малочисленности населения и низкой потребляемой мощности, рассматривается как альтернативный источник энергии, способный если не полностью снять, то в значительной степени уменьшить проблему транспортировки дизельного топлива.

Потенциальными заказчиками малых и особенно микроГЭС могут стать удаленные поселки, геологические партии, метеостанции, воинские части, частные фермерские хозяйства, рыбозаводные предприятия, туристические базы и т.д.

Многие реки Кольского п-ова порожисты. Встречаются водопады. Очень развита гидрографическая сеть. Множество болот и озер замкнуты и соединены протоками в огромные системы. Благодаря своей доступности реки Кольского п-ова часто посещаются туристами.

Таблица 1

Численность населения некоторых малых поселений Мурманской обл.  
(по данным переписи на 2010 г.)

Название	Численность населения, чел.	Административный район
П.г.т.Умба	5532	Терский
С.Оленица	27	То же
С.Варзуга	363	»
Н.п.Маяк Никодимский	3	»
С.Кузомень	84	»
С.Кашкаранцы	79	»
С.Тетрино	18	»
С.Чаваньга	87	»
С.Пялица	14	»
С.Чапома	81	»
С.Ловозеро	2828	Ловозерский
П.г.т.Ревда	8186	То же
	(на 01.01.2012)	
С.Краснощелье	491	»
С.Каневка	94	»
С.Сосновка	58	»
Г.Островной	2038	ЗАТО Островной
Н.п.Лумбовка	39	То же
Н.п.Корабельное	12	»
Н.п.Святой Нос	4	»
Н.п.Мыс Черный	14	»
Н.п.Маяк Городецкий	16	»
Н.п.Маяк Терско-Орловский	5	»
Н.п.Енский	1700	Ковдорский
С.Ена	400	То же
Н.п.Риколатва	300	»
Н.п.Куропта	100	»
Н.п.Лейпи	400	»

Особым успехом среди иностранных туристов пользуются рыболовно-охотничьи базы, расположенные на реках бассейна Баренцева моря (Рында, Харловка, Восточная Лица), Терском берегу (Кица, Хлебная, Индель, Умба) и бассейне р.Поной (Ача, Пача).

Гидрографические и гидрологические характеристики выше перечисленных рек бассейна Белого и Баренцева моря, а также их потенциальная мощность приведены в табл.2, 3.

Стоимость гидроэнергетического оборудования в России колеблется от 300 до 1200 долл/кВт. На импортное оборудование действует таможенная пошлина 16%, поэтому его стоимость несколько выше – 500-2000 долл/кВт, а для низконапорных микроГЭС 1000 – 5000 долл/кВт.

Использование малых ГЭС, особенно микроГЭС, для обеспечения электроэнергией отдаленных населенных пунктов Мурманской обл. значительно дешевле и выгоднее, чем строительство линий электропередач или эксплуатация дизельных установок. Малые и микроГЭС в настоящее время могут быть рентабельными за счет упрощения схемы их управления и работы в автоматическом режиме без обслуживающего персонала.

Среди микроГЭС особого внимания заслуживают погружные микроГЭС круглогодичного действия. Такие ГЭС разработаны в межфакультетской лаборатории Красноярского государственного технического университета (КГТУ). Они используют кинетическую энергию водного потока. Стоимость электроэнергии, выработанной такой станцией, в 5-8 раз ниже стоимости

электроэнергии дизельных электростанций. Окупаемость такой ГЭС составит 1.2-1.8 года. При серийном производстве и минимизации всех издержек рыночная стоимость микроГЭС мощностью 5 кВт, по мнению разработчиков, может составить 650-700 тыс. руб. Наплавная свободнопоточная микроГЭС может быть установлена на любых плавательных средствах и использоваться в летнее время геологическими партиями, туристическими группами и другими потребителями. Эта ГЭС может быть установлена и стационарно на дне реки на якорях. Свободнопоточная микроГЭС может работать параллельно с дизельной станцией, сокращая расход дорогостоящего топлива. Отсутствие земляных и строительных работ является большим ее преимуществом [1].

Таблица 2

Гидрографические характеристики и потенциальная мощность некоторых малых и средних рек бассейна Баренцева, Белого морей и р.Поной [2-4]

Река	Начало реки, бассейн	Длина реки, км	Падение реки, м	Уклон Реки, ‰	Потенциальная мощность, МВт
Рында	Оз. б/н., бассейн Баренцева моря	97.6	285.0	2.9	24.8
Харловка	То же	126.0	260.0	2.1	45.6
Восточная Лица	Бассейн Баренцева моря	118.3	290.0	2.4	44.8
Индель	Оз.Индель, бассейн	23.4	37.2	1.6	2.5
Хлебная	Р.Пана – притока р.Варзуга	28.7	111.0	3.9	2.3
	Между бассейнами рек Умба и Варзуга				
Умба	Оз.Умбозеро, бассейн Белого моря	124.8	151.6	1.2	79.8
Кица	Бассейн оз.Умбозеро – р.Умба	36.8	54.3	1.5	0.5
Ача	Бассейн р.Поной	79.5	131.2	1.6	6.7
Пача	То же	26.1	-	-	-

Таблица 3

Гидрологические характеристики малых и средних рек бассейна Белого, Баренцева морей и р.Поной

Река	Пост/бассейн	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Среднегодовой		Годовой объем стока, млн м <sup>3</sup>
			модуль стока, л/с км <sup>2</sup>	расход воды, м <sup>3</sup> /с	
Рында	Ст.Рында, 4.0 км от устья	1010	18.3	18.5	583
Харловка	Ст.Харловка, 2.0 км от устья	1990	16.3	32.5	1025
Восточная Лица	С.Восточная Лица, 3.0 км от устья	1870	16.1	30.2	952
Индель	Бассейн р.Пана – притока р.Варзуга	874	9.0	7.87	248.2
Хлебная	Между бассейнами рек Умба и Варзуга	261	11.5	3.0	94.6
Умба	Пор.Паялка, 3.7 км от устья	6470	12.5	81.0	2552
Кица	Бассейн оз. Умбозеро – р. Умба	277	11.5	3.18	100.3
Ача	Бассейн р.Поной, 5 км от устья	973	12.9	12.6	397
Пача	Бассейн р.Поной	132	10.0	1.32	41.6

Для потребителей электроэнергии с передвижным характером работы могут применяться современные рукавные микроГЭС. В состав микроГЭС входят: водозаборник, напорный трубопровод и энергоблок. Напорный трубопровод состоит из нескольких быстроразборных секций. Кроме того, микроГЭС комплектуется электрощитком, соединительными проводами и светильниками. Применение такой ГЭС ограничивается возможностью создания напора 3-6 м и расходом воды 50 л/с. Лучше всего она подходит для горных или холмистых местностей и водотоков с достаточно большим уклоном. Общая масса комплекта составляет 65 кг. Для работы станции в зимнее время трубопровод необходимо утеплять. Общая схема переносной рукавной микроГЭС представлена на рис.2.



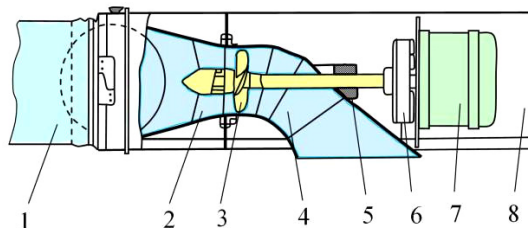


Рис.2. Рукавная переносная микроГЭС:

1 – водопровод напорный; 2 – направляющий аппарат; 3 – ротор; 4 – проточная часть; 5 – уплотнение ротора; 6 – маховик; 7 – генератор переменного тока со встроенным выпрямителем и регулятором напряжения; 8 – рама

Переносные рукавные микроГЭС выпускаются инженерно-технической фирмой ОсОО «Гидропоника» (г.Бишкек), ИНСЭТ (г.Санкт-Петербург), ОАО «Тяжмаш» и другими. Характеристики некоторых рукавных микроГЭС приведены в табл.4-6.

Таблица 4

Микро ГЭС фирмы ОсОО «Гидропоника»

Характеристика	«Шар-Булак 1.0»	«Шар-Булак 1.7»	«Шар-Булак 5.0»
Мощность, кВт	1.0	1.7	5.0
Тип генератора	Асинхронный двигатель в генераторном режиме	Асинхронный двигатель в генераторном режиме	Асинхронный двигатель
Род тока	Переменный	Переменный	Переменный
Напряжение, В	220	220	220/380
Частота, Гц	50	50	50
Расход воды, л/с	7-9	20	20-30
Напор, м	3.5-4	6-7	8
Цена, долл. США	950	1500	2200

Таблица 5

Характеристики микроГЭС фирмы «ИНСЭТ»

Диапазон			Стоимость пропеллерного агрегата, тыс. руб. (на 01.03.2012 г.)	Модель
мощностей, кВт	напоров, м	расходов, м <sup>3</sup> /с		
До 10	4-10	0.12-0.21	475	МикроГЭС-10Пр
До 15	6-12	0.12-0.303	525	МикроГЭС-15Пр
До 50	4-10	0.4-0.8	2500	МикроГЭС-50Пр

Из зарубежных разработок особенно интересными представляются гравитационно-водоворотная мини-ГЭС, предложенная австрийским изобретателем Францем Зотлетерером из Оберграфендорфа, и модель портативной микроГЭС Back Power Plant (BPP-1 и BPP-2) мощностью 500 и 600 Вт американской компании Bourne Energy.

Мини-ГЭС австрийского изобретателя состоит из специального канала, подводящего воду из русла реки по касательной к плотине, представляющей собой бетонный цилиндр. Далее вода падает в центр цилиндра, образуя водоворот, и закручивает турбину, находящуюся на глубине. Экспериментальный образец мини-ГЭС (рис.3) имеет максимальную мощность 9.5 кВт, работает при напоре 1.3 м и расходе воды 1 м<sup>3</sup>/с. К.п.д. станции достигает 73%. Стоимость такой ГЭС составляет 75 тыс. долл. США. Скорость вращения турбины невысока, поэтому не представляет опасности для рыбы. Наиболее оптимальной изобретатель считает станцию мощностью до 150 кВт при напоре свыше 0.7 м.

Таблица 6

Технические и стоимостные характеристики  
рукавных микроГЭС «Луч-1», «Луч-2», «Луч-4» и «Луч-10»

Характеристика	«Луч-1»	«Луч-2»	«Луч-4»	«Луч-10»
Мощность, кВт	1.0	2.0	4.0	10.0
Род тока	Однофазный	Однофазный	Трехфазный	Трехфазный
Напряжение, В	220	220	380	380
Частота, Гц	50	50	50	50
Масса энергоблока, кг	60	92	110	180
Габаритные размеры, мм	700x385x485	850x500x490	970x610x540	1155x850x750
Расход воды, л/с	40	50	85	145
Рабочий напор, м	5	6.5	8.5	10.0
Диаметр водовода, мм	150	180	210	270
Цена, тыс. руб.	50.4	90.7	172.9	390.0

Американская компания Bourne Energy разработала генераторы, по форме напоминающие торпеду. В ее корпусе размещается генератор, управляющая электроника с датчиками и система охлаждения. Длина торпеды составляет 0.9 м, что позволяет ее легко переносить в рюкзаке. МикроГЭС крепится с помощью троса поперек реки или ручья с глубиной более 1.2 м. Также станция может подсоединяться к сети. Модель ВРР-1 разрабатывалась для гражданского населения, а ВРР-2 – для военных. Вес первой модели – 13.5 кг, второй – 11 кг. В целях маскировки ВРР-2 может монтироваться и на дне реки. При серийном выпуске таких агрегатов стоимость их может составить 3000 долл. США [5].

В архиве компании Bourne Energy есть и более мощные генераторы RiverStar, TidalStar и OceanStar, предназначенные для работы на реках, проливах и в открытом море (соответственно). Проточный гидроагрегат River Star-50 мощностью 50 кВт (рис.4) представляет собой капсулу с поплавком для удержания ротора на заданной глубине, плавником-стабилизатором, медленно вращающейся крыльчаткой, генератором и преобразователем напряжения. Устанавливается он на тросах, натянутых поперек реки, под водой. Параллельно тросам идут кабели, передающие электроэнергию на берег. Компания Bourne Energy собирается запустить мелкосерийное производство таких агрегатов.

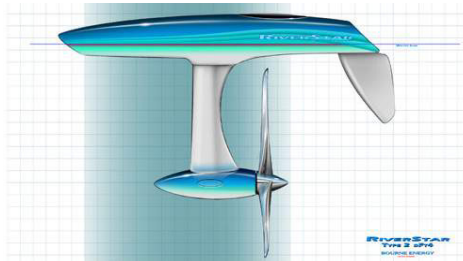
Большинство малых и средних рек Мурманской обл. по своим гидрологическим характеристикам пригодны для эксплуатации на них микроГЭС. Они достаточно многоводны и быстротечны. К тому же микроГЭС не требуют создания больших напоров воды. Выше, на рис.1, показаны возможные места для установки микроГЭС на рыболовно-охотничьих туристических базах Мурманской обл.

В зависимости от требуемой мощности и расхода реки можно подобрать множество вариантов микроГЭС для обеспечения необходимой выработки электроэнергии. Это достигается за счет вариации типов и количества устанавливаемых энергоблоков.

Как правило, нагрузка потребителя, будь то хозяйственный двор или турбаза с водо- и теплоснабжением, электроплитой и освещением, не превышает 5 кВт.

При работе микроГЭС в автономном режиме необходимы автоматические устройства, которые при уменьшении электрической нагрузки у потребителя подключают балластную нагрузку, чтобы частота вращения агрегата не превысила допустимые пределы. Автономные микроГЭС в сравнении с ВЭУ и дизель-генераторами работают непрерывно в течение суток, причем до 20 ч на балластную нагрузку [6]. В качестве балластной нагрузки могут выступать различные водонагреватели и системы отопления.

Перед потребителем в настоящее время открывается широкий спектр разнообразного отечественного и импортного гидроэнергетического оборудования в различном ценовом диапазоне.



*Рис.3. Гравитационно-водоворотная мини-ГЭС*

*Рис.4. МикроГЭС River Star-50 фирмы Bourne Energy*

## **Выводы**

Современные микроГЭС способны обеспечить электроэнергией широкий круг потребителей, начиная с индивидуальных хозяйств, садоводческих кооперативов, туристических баз и заканчивая небольшими поселками, расположенными в отдаленных районах Мурманской обл. Это позволит если не полностью решить вопрос электроснабжения, то в значительной мере сократить расходы на привозное дизельное топливо и создать комфортабельные условия проживания местного населения.

## **Литература**

1. В Сибири изготовили уникальную микроГЭС [Электронный ресурс] // Моя энергия: сайт. – Режим доступа: <http://www.myenergy.ru/popular/alternative-energeticsnovost/full/v-sibiri-izgotovili-unikalnuju-microgehs/>
2. Ресурсы поверхностных вод СССР. Кольский полуостров. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – Т.1 – 316 с.
3. Каталог рек Мурманской области. – М.; Л.: Изд. Академии наук СССР, 1962. – 210 с.
4. Водноэнергетические ресурсы Кольского полуострова. – М.; Л.: Изд. Академии наук СССР, 1961. – Вып.6 – 143 с.
5. Портативные турбины Борна [Электронный ресурс] // Проекты домов: сайт. – Режим доступа: <http://qftarchitects.net/portative-turbine-born/>
6. Кусков А. Микро-гидроаккумулирующая электростанция [Электронный ресурс] // Энергетика и промышленность России. – Режим доступа: <http://www.eprussia.ru/epr/106/8201.htm>

## **Сведения об авторах**

### **Коновалова Ольга Евгеньевна**

старший инженер лаборатории энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН  
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д.21А  
эл. почта: [konovalova@ien.kolasc.net.ru](mailto:konovalova@ien.kolasc.net.ru)

### **Иванова Елена Анатольевна**

старший инженер лаборатории энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН  
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д.21А  
эл. почта: [Ivanova@ien.kolasc.net.ru](mailto:Ivanova@ien.kolasc.net.ru)