



**ВІСНИК**  
**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО**  
**УНІВЕРСИТЕТУ**  
**«XIII»**

**21'2012**

**Харків**

# ВІСНИК

## НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Збірник наукових праць  
Тематичний випуск

21'2012

### «ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКИХ НАПРУГ»

Видання засновано Національним технічним університетом  
«Харківський політехнічний інститут» у 2001 році

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України  
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

#### КООРДИНАЦІЙНА РАДА:

**Голова:** Л.Л.Товажнянський, д-р техн. наук, проф.

**Секретар:** К.О.Горбунов, канд. техн. наук, доц.

А.П.Марченко, д-р техн. наук, проф.;	С.І.Кондрашов, д-р техн. наук, проф.;
Є.І.Сокол, д-р техн. наук, проф.;	В.М.Кошельник, д-р техн. наук, проф.;
Є.С.Александров, д-р техн. наук, проф.;	В.І.Кравченко, д-р техн. наук, проф.;
А.В.Бойко, д-р техн. наук, проф.;	Г.В.Лісачук, д-р техн. наук, проф.;
Ф.Ф.Гладкий, д-р техн. наук, проф.;	В.С.Лупіков, д-р техн. наук, проф.;
М.Д.Годлевський, д-р техн. наук, проф.;	О.К.Морачковський, д-р техн. наук, проф.;
А.І.Грабченко, д-р техн. наук, проф.;	В.І.Николаєнко, канд. іст. наук, проф.;
В.Г.Данько, д-р техн. наук, проф.;	П.Г.Перерва, д-р екон. наук, проф.;
В.Д.Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.;	В.А.Пуляєв, д-р техн. наук, проф.;
І.Ф.Домнін, д-р техн. наук, проф.;	М.І.Рищенко, д-р техн. наук, проф.;
В.В.Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.;	В.Б.Самородов, д-р техн. наук, проф.;
Ю.І.Зайцев, канд. техн. наук, проф.;	Г.М.Сучков, д-р техн. наук, проф.;
П.О.Качанов, д-р техн. наук, проф.;	Ю.В.Тимофійєв, д-р техн. наук, проф.;
В.Б.Клепиков, д-р техн. наук, проф.;	М.А.Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Харків 2012

**Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».** Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 21. – 205 с.

В збірнику представлено теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками різних організацій та установ.

Для викладачів, наукових співробітників, спеціалістів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты исследований и разработок, выполненных преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками различных организаций и предприятий.

Для преподавателей, научных сотрудников, специалистов.

#### **РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:**

**Відповідальний редактор:** В.І.Кравченко, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** Л.В.Ваврів, канд. фіз.-мат наук, ст. наук. співр.

М.І.Баранов,	д-р техн. наук, ст. наук. співр.;
Н.І.Бойко,	д-р техн. наук, доц.;
Р.К.Борисов,	канд. техн. наук;
А.Г.Гурін,	д-р техн. наук, проф.;
Б.В.Клименко,	д-р техн. наук, проф.;
Г.М.Коліушко,	канд. техн. наук, ст. наук. співр.;
В.М.Михайлов,	д-р техн. наук, проф.;
В.В.Князев,	канд. техн. наук, ст. наук. співр.;
К.Ю.Сахаров,	д-р техн. наук;
Є.І.Сокол,	д-р техн. наук, проф.;
В.В.Рудаков,	д-р техн. наук, проф.;
І.В.Яковенко,	д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співр.

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21. НТУ «ХПІ». НДПІКІ «Молнія», Тел. (057) 707-63-09. E-mail: vavriv@rambler.ru

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».  
Протокол № 4 від 17 квітня 2012 р.

ISSN 2079-0740

© Національний технічний університет «ХПІ»

*М.И. БАРАНОВ*, докт. техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
*В.М. ЗИНЬКОВСКИЙ*, зав. сектором, НТУ «ХПИ»;  
*Ю.П. ЗЯБКО*, вед. инж., НТУ «ХПИ»;  
*Н.Н. ИГНАТЕНКО*, канд. техн. наук, зав. сектором, НТУ «ХПИ»;  
*В.О. ЛЫСЕНКО*, ассистент, НТУ «ХПИ»

## **НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕХНИКИ НИПКИ «МОЛНИЯ» НТУ «ХПИ»**

Надані результати ряду експериментальних досліджень на високовольтних електроустановках електрофізичних процесів при отриманні електровибуховим методом високодисперсних матеріалів, сферичних плазмодів штучної кульової блискавки в повітряній атмосфері та визначенні міцносних характеристик діелектричних матеріалів в умовах дії на них великих імпульсних струмів.

The results of row of experimental researches are resulted on high-voltage electric options of electrophysics processes at the receipt of strongly dispersible materials an electro-explosive method, spherical of plasma educations of artificial fire-ball in an air atmosphere and determination of durability descriptions of dielectric materials in the conditions of influence on them of large impulsive currents.

Приведены результаты ряда экспериментальных исследований на высоковольтных электроустановках электрофизических процессов при получении электровзрывным методом высокодисперсных материалов, сферических плазмодов искусственной шаровой молнии в воздушной атмосфере и определении прочностных характеристик диэлектрических материалов в условиях воздействия на них больших импульсных токов.

### **Введение**

В последние годы высоковольтная импульсная техника (ВИТ) находит свое практическое применение не только в традиционной области силовой электроэнергетики при испытаниях электрической прочности газовой, жидкой и твердой изоляции [1], но и в таких сравнительно новых технических областях как энергосиловая обработка тонких металлов и конденсированных слабопроводящих сред давлением мощных ударных механических [2] и электромагнитных [3,4] волн, конверсия промышленных газообразных отходов [5,6], электровзрывное получение мелкодисперсных не- и органических материалов [7], получение искусственной линейной (ЛИМ) [8] и шаровой (ШМ) [9] молний и их применение при оценке степени молниезащиты технических объектов и испытание диэлектрических материалов на их электродинамическую стойкость к воздействию больших импульсных токов (БИТ) естественного и искусственного происхождения [10]. В этой связи актуальным и целесообразным является краткое рассмотрение ряда новых электротехнологических возможностей отечественного высоковольтного оборудования, имеющегося на сегодня в распоряжении отдела электромагнитных исследований НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» и размещенного как на испытательном полигоне (п. Андреевка, Харьковской обл.), так и в лабораторном корпусе института (г. Харьков).

## 1. Получение высокодисперсных неорганических материалов

В период 2010-2011 гг. в отделе № 6 нашего института были выполнены экспериментальные исследования по возможности получения при помощи явления электрического взрыва (ЭВ) тонких металлических проводников мелкодисперсных неорганических материалов. При этом в качестве ВИТ нами был использован действующий мощный генератор импульсной  $A$ -компоненты тока искусственной ЛМ (генератор ГИТ-А с номинальной запасаемой энергией 416 кДж в его 111 шт. импульсных конденсаторах на номинальное зарядное напряжение  $U_{3A} = \pm 50$  кВ), характеризующийся следующими собственными электрическими параметрами [8,11]: емкостью  $C_A = 333$  мкФ; индуктивностью  $L_A = 2,5$  мкГн; активным сопротивлением  $R_A = 0,057$  Ом. Плоские и круглые медные, латунные и алюминиевые токопроводы рабочего стола высоковольтного генератора ГИТ-А (рис. 1) обладали суммарной индуктивностью  $L_T \approx 2,05$  мкГн и суммарным активным сопротивлением  $R_T \approx 0,047$  Ом.

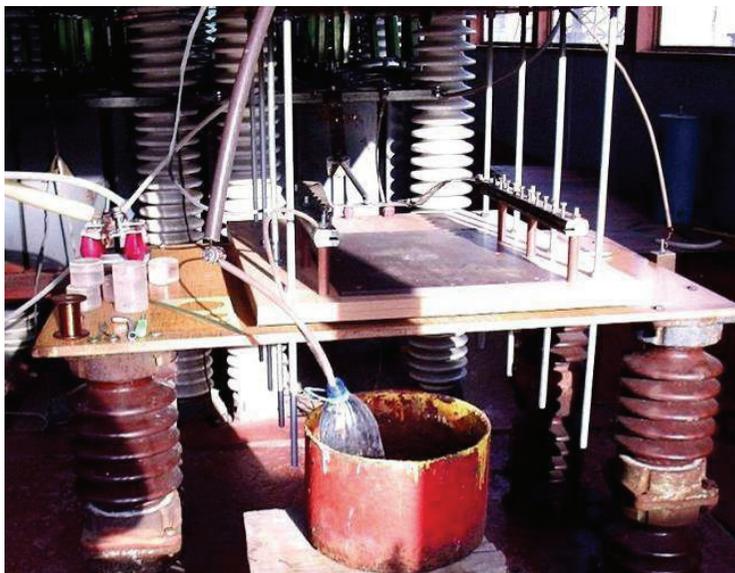


Рисунок 1 – Общий вид основных элементов сильноточной разрядной цепи высоковольтной электроустановки, используемой при подводном ЭВ тонких металлических проводов в изоляционной РК с технической водой объемом 1,5 л (РК для увеличения ее механической прочности размещена в металлическом баке с водой объемом 15 л)

Включенный в разрядную цепь генератора ГИТ-А взрывающийся тонкий медный провод диаметром  $d_k = 0,2$  мм и длиной  $l_k = 100$  мм размещался в изоляционной рабочей камере (РК), заполненной примерно на 3/4 от своего объема технической водой в количестве 1,5 л. Для измерения амплитудно-временных параметров (АВП) импульсного быстро затухающего синусои-

дальнего тока в сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-А нами в качестве рабочего измерительного средства был использован коаксиальный шунт типа ШК-300, прошедший метрологическую проверку и имеющий коэффициент преобразования, численно равный  $K_A = 11261$  А/В [8,11]. На рис. 2 приведены результаты электровзрывного действия БИТ от примененного генератора ГИТ-А, параллельно соединенные конденсаторы типа ИК 50-3 которого были заряжены до уровня  $U_{3A} \approx -7$  кВ, на металлическую структуру указанного тонкого провода.

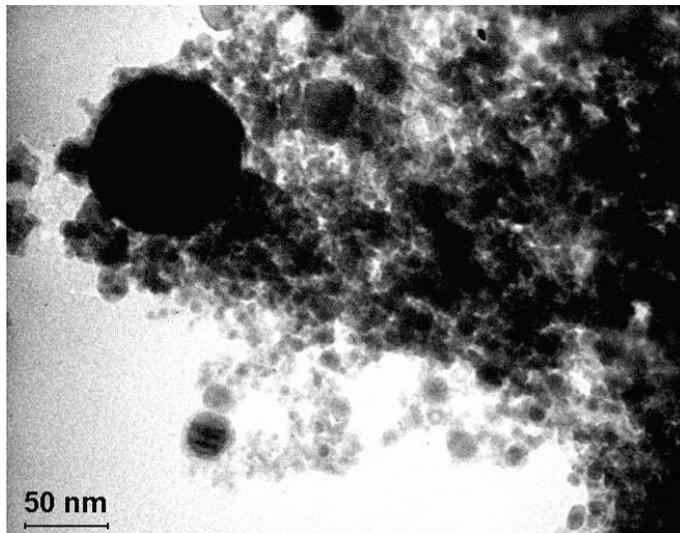


Рисунок 2 – Отдельные округлые наноструктурные неорганические образования в составе фрактального кластера вещества при подводном ЭВ тонкого медного провода в сильноточной разрядной цепи высоковольтной электроустановки ( $d_k = 0,2$  мм;  $l_k = 100$  мм;  $U_{3A} \approx -7$  кВ;  $I_{mA} \approx -40$  кА;  $\delta_{mA} \approx 350$  кА/мм<sup>2</sup>; линейный масштаб – 50 нм/метка)

Отметим, что данные согласно рис. 2 были получены при помощи просвечивающего электронного микроскопа типа ПЭМ-145К [11]. Измерения АВП протекающего через исследуемый тонкий медный провод показали, что амплитудное значение плотности тока  $\delta_{mA}$  в его не потерявшей металлической проводимости структуре при подводном ЭВ составляло около  $3,5 \cdot 10^{11}$  А/м<sup>2</sup>. Из приведенных на рис. 2 данных видно, что отдельные округлые неорганические (медные) частицы по диаметру составляют до 10 нм. Таким образом, можно заключить, что указанное здесь мощное высоковольтное оборудование нашего института может практически использоваться для получения в лабораторных и иных условиях наноматериалов 1-го рода [12], имеющих сейчас повышенный спрос на отечественном и международном рынках высоких технологий.

## 2. Получение в воздушной атмосфере плазмидов искусственной шаровой молнии

В проводимых экспериментах по возможному моделированию в воздушной атмосфере плазмидов искусственной ШМ на высоковольтном испытательном электрооборудовании авторы остановились на оригинальной двухэлектродной системе (ДЭС), содержащей как высоко-, так и низкоэлектропроводные материалы [9]. Укажем, что классическая ДЭС на основе металлических электродов той или иной конфигурации нашла широкое применение в области ВИТ [1–3]. На рис. 3 приведен общий вид специально созданной нами в 2012 году высоковольтной испытательной электроустановки энергоемкостью до 10,5 кДж для проведения подобных опытов. Данная электроустановка в своей разрядной цепи содержала шесть параллельно соединенных высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИМ 2-5-140, один воздушный многогазорный коммутатор типа МЗК-100 (с двумя закороченными и двумя рабочими воздушными промежутками длиной 2 мм каждый) и изоляционную РК с указанной выше ДЭС и технической водой объемом до 10 л.

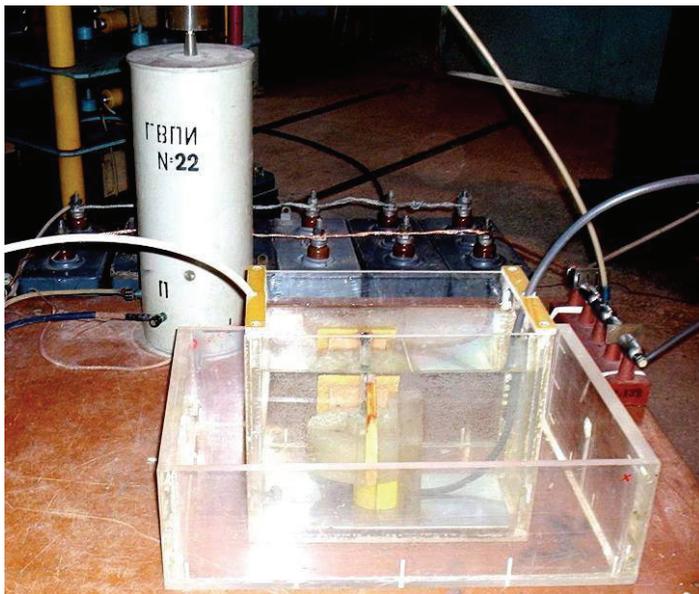


Рисунок 3 – Внешний вид основных элементов высоковольтной моделирующей электроустановки на рабочее напряжение до  $\pm 5$  кВ, формирующей в воздушной атмосфере над специальной двухэлектродной системой и изоляционной камерой с технической водой объемом до 10 л сферические плазмиды искусственной шаровой молнии

При подаче от генератора высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ), находящегося на рабочем столе этой электроустановки рядом с изо-

ляционной РК (см. рис. 3), на средний стальной электрод коммутатора типа МЗК-100 управляющего микросекундного импульса напряжения амплитудой 100 кВ происходит разряд предварительно заряженных до напряжения  $U_3 \approx 4,5$  кВ отрицательной полярности конденсаторов типа ИМ 2-5-140 на коротко описанную ДЭС рассматриваемой электроустановки. В результате не до конца изученных в [9] и нами на сегодня сложных электрофизических процессов прямо в зоне ДЭС и изоляционной РК с технической водой наблюдается формирование ярко светящегося сферического плазмоида искусственной ШМ. На рис. 4 показана финальная стадия образования в воздушной атмосфере над ДЭС, размещенной в РК с водой, подобного плазмоида ШМ округлой формы.

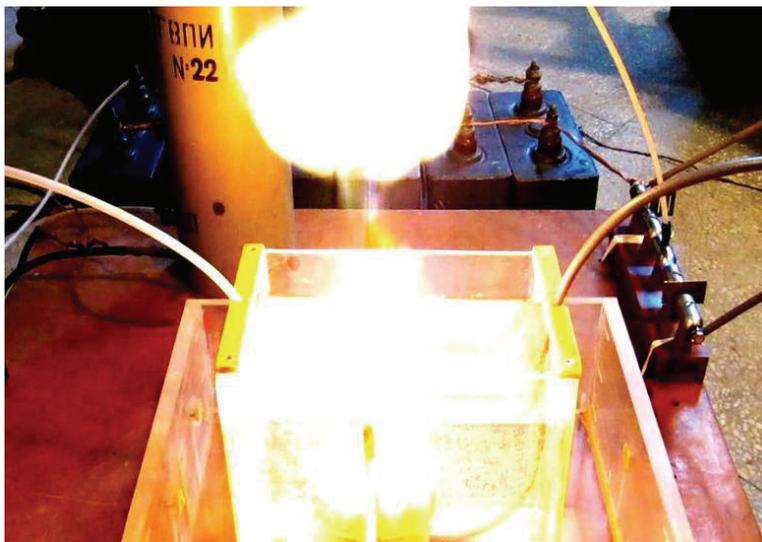


Рисунок 4 – Финальная стадия образования в воздушной атмосфере над специальной двухэлектродной системой и выполненной из оргстекла изоляционной камерой с технической водой высоковольтной моделирующей электроустановки ярко светящегося сферического плазмоида искусственной шаровой молнии ( $U_3 \approx -4,5$  кВ и  $I_m \approx -2,8$  кА)

Амплитуда высокочастотного затухающего импульсного тока  $I_m$ , протекающего в разрядной цепи использованной электроустановки от наводки при работе ГВПИ и измеренного при помощи указанного ранее коаксиального шунта типа ШК-300 [8] и запоминающего цифрового осциллографа типа Tektronix TDS 1012, была примерно равной 2,8 кА. Отметим, что диаметр плазмоида, приведенного на рис. 4 и полученного при помощи цифровой камеры типа Canon SX 200JS, составляет около 0,2 м. Полная длительность процесса образования (от момента начала формирования до момента визуального видимого исчезновения) наблюдаемых в проведенных нами экспериментах плазмодов искусственной ШМ (время их «жизни») оказывается равной не более 1 с.

### 3. Определение прочностных характеристик диэлектрических материалов в условиях воздействия на них бит

При оценке электродинамической стойкости твердых диэлектрических материалов, применяемых в изоляционных несущих и иных рабочих конструкциях объектов ВИТ, требуется проведение их соответствующих испытаний, предусматривающих использование высоковольтных электроустановок и протекание вдоль их наружных поверхностей и внутренних структур БИТ с теми или иными АВП [1,13,14]. Для исследования возможности применения для подобных научно-технических целей имеющегося в нашем распоряжении высоковольтного оборудования были проведены необходимые эксперименты применительно к «живой» (растущей или срезанной прямо перед испытаниями) и «мертвой» (давно срезанной и высушенной в естественных климатических условиях) древесины сосны. С этой целью нами был использован кратко описанный в разделе 1 этой статьи генератор ГИТ-А [8], имитирующий импульсную А- компоненту тока искусственной ЛМ. На рис. 5 показан закрепленный на рабочем столе генератора ГИТ-А испытываемый опытный образец «мертвой» древесины сосны, имеющий диаметр  $d_H = 100$  мм и высоту  $h_H = 50$  мм.

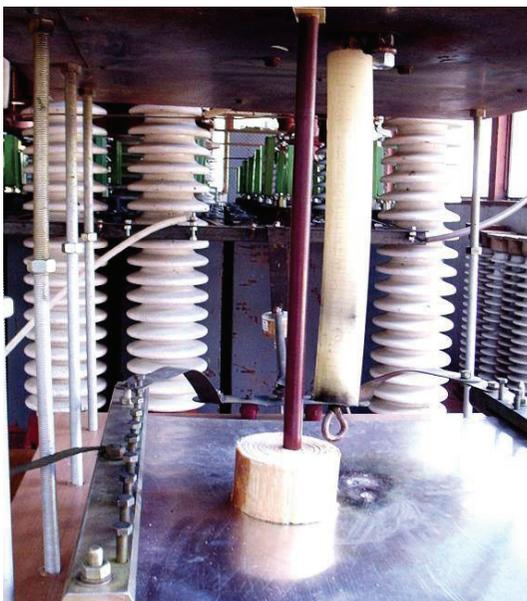


Рисунок 5 – Внешний вид опытного образца «мертвой» древесины сосны ( $d_H=100$  мм;  $h_H=50$  мм) перед его электродинамическими испытаниями в силовоточной разрядной цепи генератора тока искусственной линейной молнии (генератора ГИТ-А [8])

Для ввода БИТ во внутреннюю исследуемую структуру опытных образцов древесины сосны нами был применен тонкий электрически взрывающийся

медный провод диаметром  $d_k = 0,2$  мм и длиной  $l_k = 50$  мм. Измерение АВП протекающего вдоль исследуемой целлюлозной структуры древесины выполнялось как и в предыдущих опытах при помощи коаксиального шунта типа ШК-300 и запоминающего цифрового осциллографа типа Tektronix TDS 1012. На рис. 6 представлены результаты электродинамических испытаний в сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-А опытного образца «мертвой» древесины сосны (на заднем плане данного рисунка хорошо видны используемые в составе генератора ГИТ-А шунт типа ШК-300 и конденсаторы типа ИК 50-3).



Рисунок 6 – Внешний вид опытного образца «мертвой» древесины сосны после его электродинамического испытания в сильноточной разрядной цепи генератора импульсной А- компоненты тока искусственной линейной молнии ( $U_{3A} \approx -7$  кВ и  $I_{mA} \approx -41,4$  кА)

Из данных рис. 6 следует, что при протекании вдоль образуемой ЭВ тонкого медного провода, установленного в зоне заболони исследуемой древесины, низкотемпературной «металлической» плазмы БИТ с амплитудой его первой полуволны  $I_{mA}$  около 41,4 кА происходит локальное разрушение (щепление) испытываемого опытного образца сосны. Проведенные дальнейшие испытания показали, что амплитудный уровень тока  $I_{mA} \approx 41,4$  кА является той критической величиной, которая определяет электродинамическую стойкость «мертвой» древесины сосны к прямому воздействию на нее БИТ ЛМ.

## Выводы

Представленные здесь экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что указанное высоковольтное оборудование НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» может быть успешно использовано в таких сравнительно новых видах электротехнологий как получение неорганических наноматериалов 1-го рода, имитация в воздушной атмосфере сферических плазмоидов искусственной ШМ для дальнейшего изучения естественной ШМ и проведение испытаний элементов деревянных конструкций на их электродинамическую стойкость к прямому воздействию на них БИТ различных АВП.

**Список литературы:** 1. *Кужекин И.П.* Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с. 2. *Гулый Г.А.* Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 3. *Баранов М.И.* Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов: история, физические основы и технические возможности // *Электротехника і електромеханіка.* – 2009. – № 1. – С. 42-54. 4. *Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бондаренко А.Ю.* Инструмент для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2007. – № 11 (47). – С. 44-51. 5. *Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник для вузов / Под общ. ред. И.П. Верецагина.* – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 704 с. 6. *Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М.* и др. Использование импульсного коронного разряда с расширенной зоной ионизации для конверсии токсичных газобразных отходов // *Электротехника і електромеханіка.* – 2007. – № 4. – С. 64-65. 7. *Лернер М.И.* Электровзрывные нанопорошки неорганических материалов: технология производства, характеристики, области применения. Автореферат дис. ... д-р техн. наук (01.04.07). – Томск (Россия), 2007. – 31 с. 8. *Баранов М.И., Колушко Г.М., Кравченко В.И.* и др. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // *Приборы и техника эксперимента.* – 2008. – № 3. – С. 81-85. 9. *Егоров А.И., Степанов С.И., Шабанов Г.Д.* Демонстрация шаровой молнии в лаборатории // *Успехи физических наук.* – 2004. – Т. 174, № 1. – С. 107-109. 10. *Баранов М.И., Лысенко В.О.* Приближенные модели электродинамического разрушения древесины в атмосферном воздухе под действием прямого удара в нее линейной молнии // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 39. – С. 10-18. 11. *Баранов М.И.* Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х тт. Т. 2, кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: Изд-во «Точка», 2010. – 407 с. 12. *Баранов М.И.* Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Т. 1. – Х.: Изд-во «НТМТ», 2011. – 311 с. 13. *Межгосударственный стандарт ГОСТ 1516.2-97.* Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – Минск: Изд-во стандартов, 1997. – 31 с. 14. *ГОСТ 17512-82.* Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 32 с.

*Поступила в редколлегию 06.04.2012*

*А.Д.БЛАЩЕНКО*, науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев;  
*Н.П.ГОЛОВИНА*, мл. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев

## **ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ МИНИМАЛЬНО ВОЗМОЖНЫЕ ПРЕДПРОБИВНЫЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ**

Розроблено підхід щодо визначення параметрів електродної системи імпульсного електроразрядного джерела енергії, що реалізує високовольтний пробій рідини. Представлені алгоритм та рівняння дозволяють з урахуванням механічної стійкості електроду та його ерозії у результаті електричного розряду визначати радіус та довжину оголеної частини електроду, а також довжину міжелектродного проміжку за умови забезпечення мінімально можливих передпробивних втрат енергії.

The approach for determining the electrode system parameters of pulse electrical discharge energy source with high-voltage breakdown of water is developed. The presented algorithm and equations allow considering the electrode mechanical stability and its erosion as a result of electrical discharge to determine radius and length of the exposed electrode part, as well as length of the electrode gap providing the minimum of breakdown energy losses.

Разработан подход к определению параметров электродной системы импульсного электроразрядного источника энергии, реализующего высоковольтный пробой воды. Представленные алгоритм и уравнения позволяют с учетом механической стойкости электрода и его эрозии в результате электрического разряда определять радиус и длину оголенной части электрода, а также длину межэлектродного промежутка при условии обеспечения минимально возможных предпробивных потерь энергии.

**Введение.** В работе [1] был представлен подход к оптимизации разрядно-импульсных технологий (РИТ) на базе высоковольтного пробоя воды. Суть подхода заключается в нахождении параметров импульсного электроразрядного источника энергии (ИЭРИЭ), которые могли бы обеспечить необходимое силовое воздействие на объект обработки, требуемое для реализации выбранной РИТ. Посредством решения цепочки обратных задач по известной временной зависимости давления в точке рабочей среды  $P(t)$  при заданных величинах геометрии электродной системы (радиуса электрода –  $r_e$  и длины его оголенной части –  $l_e$ ), электропроводности рабочей среды (воды)  $\sigma_v$  и относительных предпробивных потерь энергии определяются параметры ИЭРИЭ (индуктивность –  $L$ , емкость конденсаторной батареи –  $C$ , зарядное напряжение –  $U_z$ , длина межэлектродного промежутка –  $l$ ).

Однако вышеупомянутый подход не затрагивает вопрос расчета параметров электродной системы ( $r_e$ ,  $l_e$ ). Но поскольку от параметров электродной системы зависят предпробивные потери энергии, минимизация которых является критерием, на который следует опираться при проведении оптимизации РИТ, выбор величин  $r_e$  и  $l_e$  должен быть научно обоснован.

С одной стороны, уменьшение радиуса электрода  $r_e$  и длины его оголенной части  $l_e$  приводят к уменьшению неизолированной поверхности электрода  $S_e$ , контактирующей с жидкостью, и способствует уменьшению непроеизводи-

тельных предпробивных потерь энергии  $W_n$  [2, 3]. С другой стороны, с уменьшением  $S_e$  увеличивается износ электрода вследствие электрической эрозии металла, а также снижается его механическая стойкость. Кроме того, уменьшение  $l_e$  приводит к увеличению скользящих разрядов по поверхности изоляции электрода, что ведет к ее разрушению. Таким образом, очевидно, что для обеспечения минимальной величины  $W_n$ , при достаточной механической стойкости и высокой долговечности, электродная система должна отвечать противоречивым требованиям.

Поэтому **цель** данной работы: с учетом требуемой механической стойкости электрода и допустимой электрической эрозии определить оптимальные значения радиуса  $r_e$  и оголенной части электрода  $l_e$ , обеспечивающие минимально возможные предпробивные потери энергии  $W_n$ .

**Основная часть.** Для достижения поставленной цели рассмотрено выражение для определения предпробивных потерь энергии с учетом параметров электродной системы [2]

$$W_n = \frac{2\sqrt{\pi \cdot S_e} \cdot \alpha \cdot l \cdot \sigma_v \cdot U_z^2 \cdot (1 + 40l)}{(U_z - U_0)^2}, \quad (1)$$

где  $\alpha = 0,36 \cdot 10^6$  – постоянная, В<sup>2</sup>·с/м;  $\sigma_v$  – удельная электропроводность воды, См/м;  $S_e = 2 \cdot \pi \cdot r_e \cdot l_e$  – площадь оголенной поверхности электрода, м<sup>2</sup>;  $U_0 = 1,82 \cdot 10^6 \cdot r_e \cdot \ln(4 \cdot l/r_e)$  – минимальное пороговое напряжение пробоя, В.

В работе [4] показано, что при определении параметров ИЭРИЭ по известному давлению в точке рабочей среды  $P(t)$  с использованием подхода на базе решения обратных задач [1], зарядное напряжение  $U_z$  может быть представлено в виде функции длины межэлектродного промежутка  $U_z(l)$ . Таким образом, при известной зависимости  $U_z(l)$  и значениях  $r_e$ ,  $l_e$ ,  $\sigma_v$  предпробивные потери энергии  $W_n$ , определяемые выражением (1), можно представить в виде функции длины межэлектродного промежутка  $W_n(l)$ .

Для проведения дальнейших рассуждений воспользуемся данными расчета, представленными в работе [3], где по давлению  $P(t)$  была найдена функциональная зависимость  $U_z(l)$ . Проводимость воды  $\sigma_v$ , определяемую местом эксплуатации создаваемого технологического устройства, принимаем равной  $\sigma_v = 0,055$  См/м (характерное значение для Николаевского региона). При указанных условиях для фиксированного значения длины оголенной части электрода  $l_e = 0,02$  м, изменяя его радиус  $r_e$  в диапазоне от 2 до 6 мм, построена серия функциональных зависимостей  $W_n(l)$ , которые имеют минимумы (рис. 1).

Путем анализа представленных характеристик на экстремум (рис. 1) определялась зависимость радиуса электрода от длины разрядного промежутка  $r_e(l)$  соответствующая минимальным значениям предпробивных потерь энергии  $W_{\min}$  (рис. 2). Проведя аналогичные расчеты для длин оголенной части электрода  $l_e$ , изменяющихся от 0,01 до 0,08 м (диапазон значений  $l_e$  в электродных системах большинства используемых РИТ), получена серия зависимостей радиуса электрода от длины межэлектродного промежутка  $r_e(l)$  при условии минимальных предпробивных потерь энергии  $W_{\min}$  (рис. 2).

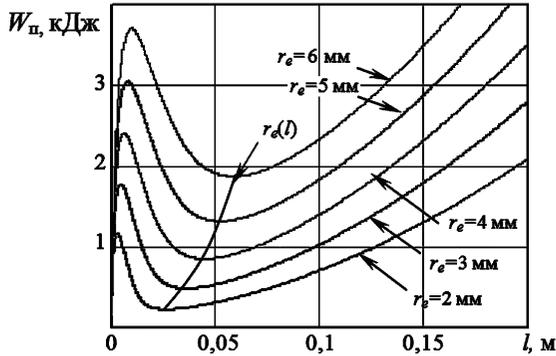


Рисунок 1 – Зависимость предпробивных потерь энергии  $W_{II}$  в функции длины разрядного промежутка  $l(U_z)$  [4]

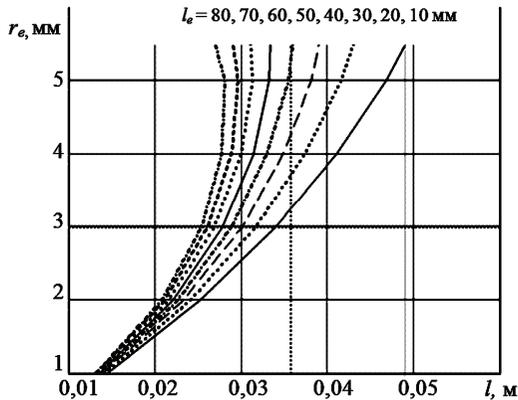


Рисунок 2 – Функциональные зависимости  $r_e(l)$ , полученные при условии обеспечения минимальных предпробивных потерь энергии  $W_{min}$

Как уже упоминалось выше, при конструировании электродной системы необходимо учитывать электрическую эрозию материала электрода. Она может быть определена исходя из массы металла, которая выносится с электрода на протяжении одного разряда заданной мощности [5]

$$mb = \frac{Kd \cdot U_{\text{э}} \cdot A}{\frac{3 \cdot C_y \cdot (T_{пл} - T_0) + Q_{пл}}{Kb} + Qu}, \quad (2)$$

где  $Kd$  – коэффициент, учитывающий влияние поперечного сечения электрода на массу выброшенного за разряд металла;  $U_{\text{э}}$  – эквивалентный энергетический потенциал, В;  $A$  – интеграл разрядного тока, А·с;  $C_y$  – удельная теплоемкость материала электрода, Дж/кг·С°;  $T_{пл}$  – температура плавления материала электрода, С°;  $T_0$  – начальная температура, С°;  $Q_{пл}$  – удельная теплота плавления, Дж/кг;  $Qu$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $Kb$  – коэффици-

ент выброса.

Для расчета в качестве материала электрода выбрана сталь. Для стали:  $Kb = 0,055$ ,  $Cy = 450$  Дж/кг·С°,  $T_{пл} = 1539$  °С,  $Q_{пл} = 266 \cdot 10^3$  Дж/кг,  $Q_u = 61,2 \cdot 10^5$  Дж/кг, начальная температура принята  $T_0 = 20$  °С. При подводных искровых разрядах средней мощности значение эквивалентного потенциала частиц плазмы, взаимодействующих с электродом,  $U_{\text{э}}$  находится в диапазоне от 17 В до 20 В [5]. При колебательном разряде с малым декрементом затухания без значительной погрешности можно принять как для анода, так и для катода  $U_{\text{э}} = 18,5$  В [5]. Интеграл разрядного тока определен для рассматриваемого случая, представленного в работе [3],  $A = 0,32$  А·с. Влияние диаметра электрода на массу выброшенного за разряд металла учитывается коэффициентом  $Kd$ , который зависит от радиуса электрода и может быть представлен в виде функциональной зависимости от  $r_e$  (рис. 3) [5].

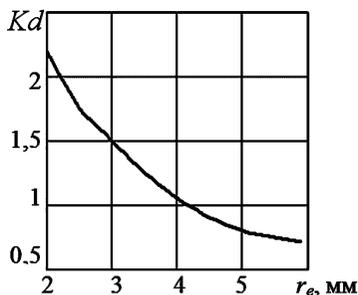


Рисунок 3 – Функциональная зависимость  $Kd(r_e)$

При расчете параметров электродной системы оперируют количеством металла, выносимым за час работы [5], то есть необходимо знать число разрядов за час работы, которое можно определить из соотношения

$$Np = f \cdot 3600, \quad (3)$$

где  $f$  – частота следования импульсов, определяемая требованиями технологии. Для расчета принято  $f = 0,5$  Гц (технология электрогидроимпульсной штамповки), тогда, исходя из (3), число разрядов за 1 час работы  $Np = 1800$ .

В результате может быть определено уменьшение длины электрода за 1 час работы

$$\Delta l_e = \frac{mb \cdot Np}{\gamma \cdot \pi \cdot r_e^2}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – плотность материала электрода, кг/м<sup>3</sup>; для стали  $\gamma = 7,88 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Длительность непрерывной работы электродной системы может быть выражена как отношение длины оголенной части электрода к уменьшению его длины

$$T_p = \frac{l_e}{\Delta l_e}. \quad (5)$$

Для расчета принято  $T_p = 24$  часа.

На основании опыта эксплуатации и рекомендаций к конструированию электродных систем линейной геометрии [5] минимальная величина оголенной части электрода  $h_{min}$  принята равной 0,03 м и должна быть учтена в выражении определения начального размера высоковольтного электрода. С учетом вышесказанного, выражение (5) принимает вид

$$l_e = T_p \cdot \Delta l_e + h_{min}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) выражения (2) – (4), получаем возможность построения  $l_e(r_e)$  (рис. 4).

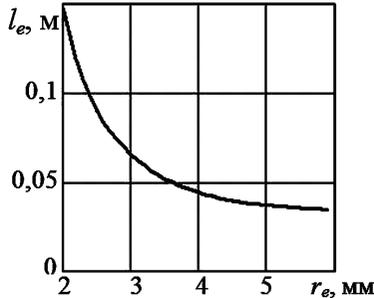


Рисунок 4 – Зависимость оголенной части электрода от его радиуса  $l_e(r_e)$

Следует отметить, что за время эксплуатации электродной системы с целью поддержания необходимого технологического режима межэлектродный промежуток должен сохраняться постоянным, что может быть достигнуто путем автоматического или ручного регулирования.

Для того, чтобы по рис. 4 стало возможным однозначно определять радиус электрода и длину его оголенной части, проводились исследования механической стойкости электрода.

Известно, что при искровом разряде в воде с высоковольтным пробоем длина канала разряда превышает межэлектродный промежуток [2]. Это утверждение позволяет допустить, что плазменный канал развивается с электрода под некоторым углом к его оси. Такое же несоосное развитие канала может быть вызвано любой незначительной асимметрией края электрода. Подтверждением этого допущения может служить форма края электрода, которая в процессе эксплуатации становится сферической. Соответственно, вектор силового воздействия на конец электрода будет направлен под некоторым углом. Таким образом, можно утверждать, что в процессе эксплуатации к электроду прилагаются поперечные нагрузки, способные в определенных случаях повлечь за собой его деформацию и, в конечном итоге, привести к разрушению. Этот факт предлагается использовать при расчете радиуса электрода, обеспечивающего длительную его механическую стойкость. Опираясь на теоретические основы сопротивления материалов [6], предлагается рассматриваемый электрод представить в виде зажатой балки (консоли) (рис. 5) с круглым сечением.

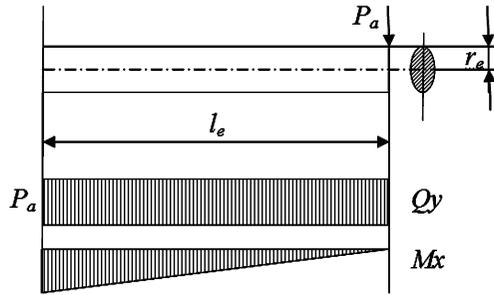


Рисунок 5 – Распределение поперечной силы и изгибающего момента

Как видно из рис. 5 в поперечном сечении стержня при поперечном изгибе возникают два силовых фактора: изгибающий момент  $Mx$  и поперечная сила  $Qy$ . По эпюрам  $Mx$  и  $Qy$  определяется опасное сечение (в конечном итоге радиус электрода), т.е. сечение при котором может произойти разрушение. При этом напряженное состояние представляется упрощенно плоским, при котором в окрестности произвольно выбранных точек поперечного сечения действуют нормальные и касательные напряжения. Поэтому условие прочности для таких точек должно быть сформулировано на основе какого-нибудь уже известного критерия прочности.

Вполне очевидно, что максимальная нагрузка на зажатую балку, приложенная к ее оконечности, создает в материале в точке ее зажатия максимальное напряжение  $max \sigma$ . При этом обеспечение целостности материала стальной балки может быть реализовано при условии

$$\max \sigma = \frac{\max Mx}{W} \leq [150 \cdot 10^6], \quad (7)$$

где  $W$  – момент сопротивления при сгибе (для цилиндра  $W = \pi \cdot (2 \cdot r_e)^3 / 32$ ),  $m^3$ ; допустимое напряжение или предел упругости для стали  $[max \sigma] = 150 \text{ МПа}$ .

В выражении (7) остается неизвестной величина изгибающего момента  $Mx$ .

$$Mx = FM_e \cdot l_e, \quad (8)$$

где  $FM_e$  – поперечная составляющая усилия, в результате давления в плазменном канале, приложенного к концу электрода, Н. Анализ результатов экспериментов и параметров электродных систем реальных технологических установок позволил предположить, что в среднем

$$FM_e = \frac{P_a \cdot \pi \cdot r_a^2}{8}, \quad (9)$$

где  $P_a$  – давление в канале разряда, Па;  $r_a$  – радиус канала разряда,  $m^2$ .

Параметры  $P_a$  и  $r_a$  являются временными зависимостями, однако для расчетов достаточно использовать амплитудные значения. В рассматриваемом случае [3]:  $P_a = 315 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ,  $r_a = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $FM_e = 123,64 \text{ Н}$ .

На рис. 6 графически представлено условие (7) с учетом выражений (8), (9).

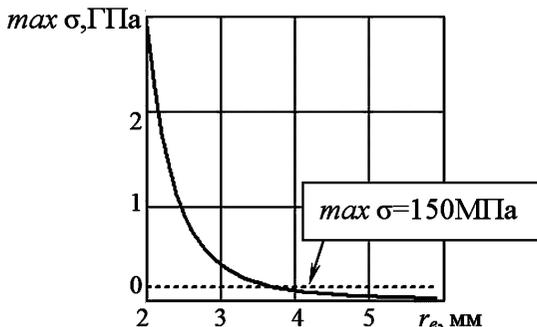


Рисунок 6 – Выбор допустимого с точки зрения прочности радиуса электрода

Таким образом, для принятых в работе условий значение радиуса электрода, соответствующее точке пересечения зависимостей на рис. 6,  $r_e = 0,038$  м является наименьшим допустимым с точки зрения механической прочности. Используя это значение в зависимостях, представленных на рис. 4 и рис. 2, становится возможным определить длину оголенной части электрода и длину межэлектродного промежутка соответственно при условии минимальных предпробивных потерь энергии  $W_{\min}$ :  $l_e = 0,048$  м,  $l = 0,031$  м.

## Выводы

1. Представлен подход к определению оптимальных параметров электродной системы ( $r_e$ ,  $l_e$ ,  $l$ ) для ИЭРИЭ, использующих электроразряд с высоковольтным пробоем. Разработанный алгоритм и соответствующие уравнения позволяют с учетом механической стойкости электрода и влияния на него электрической эрозии проводить расчет значений радиуса  $r_e$  и оголенной части электрода  $l_e$ , а также длину межэлектродного промежутка  $l$ , обеспечивающие минимально возможные предпробивные потери энергии.

2. Предложенные уравнения могут служить дополнением к математическим моделям, разработанным в рамках подхода на базе решения обратных задач и позволяющим определять оптимальные параметры ИЭРИЭ, которые обеспечивали бы заданный разрядноимпульсный технологический процесс.

**Список литературы:** 1. *Вовченко А.И.* Оптимизация электрогидроимпульсных технологий и выбор соответствующих режимов работы источников энергии для них / *А.И.Вовченко, Н.П. Дивак, Р.В. Тертилов* // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 6. – С. 54-60. 2. *Кужекин И.П.* Импульсный пробой и канал разряда в жидкости: Дис. канд. техн. наук. 05.09.05 / Моск. энэрг. ин-т. – М.: 1967. – 186 с. 3. *Вовченко А.И.* Синтез емкостных энергоисточников для высоковольтных электро-технологических установок с учетом предразрядных процессов / *А.И.Вовченко, Н.П. Дивак* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 18. – С. 61-67. 4. *Дивак Н.П.* Оптимизация электрогидроимпульсных технологий на базе высоковольтного пробоя, использующих энергоисточники с зарядным напряжением до  $5 \cdot 10^4$  В / *Н.П. Дивак* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 34. – С. 18-24. 5. *Гульий Г.А.* Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах / *Г.А Гульий, П.П. Малюшевский*. – К.: Наукова думка, 1977. – 174 с. 6. *Беляев Н.М.* Сопротивление материалов / *Н.М. Беляев*. – М.: Наука, 1976. – 608 с.

Поступила в редколлегию 31.03.2012.

**Л.З.БОГУСЛАВСКИЙ**, канд. техн. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

**Л.Н.МИРОШНИЧЕНКО**, канд. техн. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

**В.В.ДИОРДИЙЧУК**, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

**Н.С.ЯРОШИНСКИЙ**, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

**А.В.КОВАЛЬЧУК**, ООО «Центрпромгруп», Николаев;

**А.Ф.ПАПЫРИН**, канд. техн. наук, ООО «Промтех», Николаев

### **ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ДОЗАРЯДКИ РАЗНОИМПЕДАНСНОЙ ПЫЛИ В КОМПЛЕКСНЫХ СИСТЕМАХ ГАЗООЧИСТКИ**

Розглянуто можливості інтенсифікації процесів газоочистки шляхом дозарядки різноімпедансного пилу імпульсним джерелом живлення.

Processes of intensification treatment of exhausted gases by the charging up of various impedance dust with high voltage pulses are described.

Рассмотрены возможности интенсификации процессов газоочистки путем дозарядки разно импедансного пыли импульсным источником питания.

**Введение.** Повышение эффективности электрофильтра и уменьшение выбросов золы с дымовыми выбросами тепловых электростанций является актуальной задачей.

В работе представлены результаты совместных исследований Института импульсных процессов и технологий НАН Украины, а также предприятий «Центрпромгруп» и «Промтех» по оптимизации режимов электрического питания электрофильтров путем увеличения мощности, передаваемой в коронный разряд электрофильтра. Последнее может быть достигнуто за счет использования комбинированного режима питания с наложением импульсной составляющей на действующее постоянное напряжение штатного аппарата питания.

Существующая зарубежная практика использования комбинированных режимов питания электрофильтров с импульсной составляющей в микросекундном диапазоне свидетельствует о том, что такие режимы могут существенно уменьшить выбросы золы при существующей геометрии электродной системы электрофильтра. По данным российских исследователей, испытания комбинированного режима, проведенные на электрофильтрах Каширской ТЭС, показали возможность снижения выбросов золы в четыре раза. Аналогичные результаты получены в США, Швеции и Японии.

Развитию этого направления способствует успехи последнего времени в

развитии высоковольтной импульсной техники и силовой электроники. За последние годы разработаны коммутаторы, с ресурсом в тысячи часов, позволяющие генерировать импульсы напряжения микросекундной и наносекундной длительности с напряжениями в несколько сот киловольт, токами в импульсе в сотни килоампер. Развитие элементной базы силовой электроники (повышение мощностного и частотного уровней силовых ключей) позволило разработать малогабаритные высокочастотные зарядные устройства генераторов импульсных токов. Это открывает новые перспективы модернизации и реконструкции систем питания электрофильтров с использованием комбинированных режимов.

Использование комбинированных режимов питания электрофильтров должно привести к интенсификации процессов дозарядки разноимпеданной пыли в системах газоочистки. Это может оказаться выходом при ужесточающихся требованиях к выбросам дисперсных частиц от экологически вредных промышленных объектов без их глобальной реконструкции. Исследования комбинированного питания электрофильтров постоянным и импульсным током, в промышленных масштабах, в Украине выполнены впервые.

Проведенные работы оказались возможными только благодаря финансовой и организационной поддержке руководства ОАО «Донбассэнерго» и руководства Славянской ТЭС

Цель работы – интенсификация процессов газоочистки путем дозарядки разноимпеданной пыли дополнительным высоковольтным импульсным источником питания в действующих системах газоочистки.

**Анализ проблемы.** Теоретическое обоснование эффективности комбинированных режимов питания можно понять из уравнения, описывающее динамику коронного разряда для случая питания электрофильтра импульсным током [1]:

$$\bar{E} \operatorname{grad}(\rho k) + \rho k \operatorname{div} \bar{E} = \bar{E} \operatorname{grad}(\rho k) \frac{\rho - \bar{E} \operatorname{grad}(\varepsilon_a)}{\varepsilon_a} = \frac{\partial \rho}{\partial t},$$

где  $k$  – подвижность частиц,

$\varepsilon_a$  – диэлектрическая проницаемость среды,

$\rho$  – плотность объемного заряда.

Отсюда, мгновенная напряженность поля в межэлектродном промежутке при импульсном токе представляется в виде

$$E(\rho, t) = \frac{\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho k)^2}{\varepsilon_a k} \cdot \frac{\varepsilon_a \operatorname{grad}(\rho k)}{\varepsilon_a}.$$

В сравнении с этим, выражение напряженности для стационарной униполярной короны имеет вид [2]:

$$\bar{E} = \frac{(\rho k)^2}{\varepsilon_a \operatorname{grad}(\rho k)}.$$

Эффективность очистки электрофильтра определяется скоростью дрейфа частиц к осадительным электродам, которая описывается выражением [1]

$$v = \frac{0.0118 \cdot 10^{-10} \cdot E^2}{\mu_a} r,$$

где  $E$  – напряженность поля в межэлектродном промежутке,  
 $r$  – радиус частиц,  
 $\mu_a$  – вязкость воздуха.

Скорость дрейфа взвешенных частиц возрастает с ростом напряженности поля, однако при определенном значении напряжения на электродах происходит пробой газового промежутка и возникает дуга. Поэтому оптимальным значением напряжения на электродах считается такое его значение, которое является максимально близким к пробойному.

Для реализации теоретических положений повышения степени очистки и уменьшения энергопотребления импульсный источник должен генерировать импульсы в диапазоне от 10 Гц до 1 кГц; длительность импульса должна быть достаточной для поддержания поля и не превышая предела при которой коронный разряд переходит в искровой; для реализации стримерного коронного разряда передний фронт импульса должен находиться в наносекундном диапазоне; предварительную ионизацию газообразной среды можно заменить созданием неравномерного поля вокруг электродов, обеспечивающего напряженность электрического поля не менее 2 МВ/м в каждой точке образования стримера.

**Схема эксперимента.** Разработанный импульсный источник питания (ИИП) был интегрирован в штатную систему питания электрофильтров. Блок-схема комбинированной системы приведена на рис. 1.

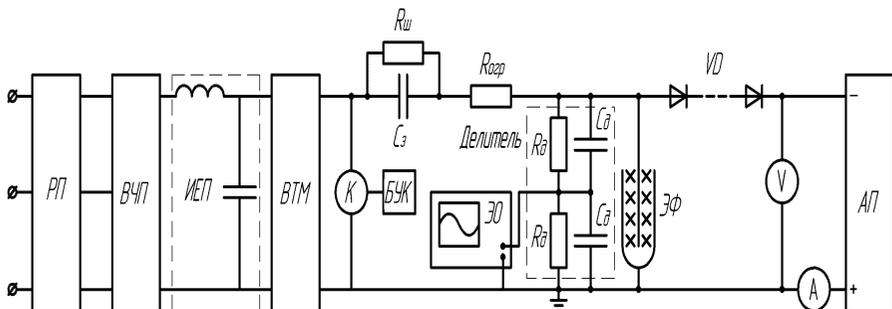


Рисунок 1 – Блок схема комбинированного питания электрофильтра:

РП – регулятор питания; ВЧП – высокочастотный преобразователь; ИЕП – индуктивно-емкостной преобразователь; ВТМ – выпрямитель-трансформатор масляный; К – коммутатор; БУК – блок управления коммутатором;  $R_{ш}$  – сопротивление шунтирующее;  $C_з$  – емкость зарядная;  $R_{огр}$  – сопротивление ограничительное; ЭО – электронный осциллограф; ЭФ – электрофильтр; VD – диодная сборка; АП – агрегат питания штатный

Импульсный источник питания разработан на базе генератора импульсных токов с промежуточным преобразователем частоты, благодаря которому его удельные массо-габаритные показатели составили 8кг/кВт.

Изготовленный импульсный источник комбинированного питания электрофильтра содержит коммутатор, позволяющий регулировать амплитуду выходного напряжения в диапазоне от 0 до 75 кВ, частоту импульсов до 20 Гц, длительностью импульсов 20 мкс, скорость нарастания переднего фронта импульсов напряжения не менее 1 кВ/нс.

При принятой схеме соединения штатный агрегат питания, создает амплитудное напряжение на полях электрофильтра 50 кВ. Подключение импульсного источника может обеспечить суммарное напряжение на электрофильтре от 0 до 125 кВ, с регулируемым значением постоянной составляющей в диапазоне от 0 до 50 кВ. Импульсная составляющая может находиться в диапазоне от 0 до 75 кВ.. Средняя мощность импульсного источника составляет 15 кВт при коэффициенте полезного действия 0,75, потребляемый ток в первичной цепи – до 40 А. Общий вид экспериментального импульсного оборудования для интенсификации процесса газоочистки приведен на рис. 2.



Рисунок 2 – Общий вид экспериментального импульсного оборудования во время натурного эксперимента на ТЭС

Характерная осциллограмма напряжений и токов на электрофильтре при  $U_{\text{пост.}} = 48 \text{ кВ}$  и  $U_{\text{имп.}} = 38 \text{ кВ}$  приведена на рис. 3.

В штатном режиме питания электрофильтра при максимальном среднем напряжении 45 кВ и среднем токе 5 мА, мощность передаваемая в полу-поле электрофильтра составляет 222 Вт.

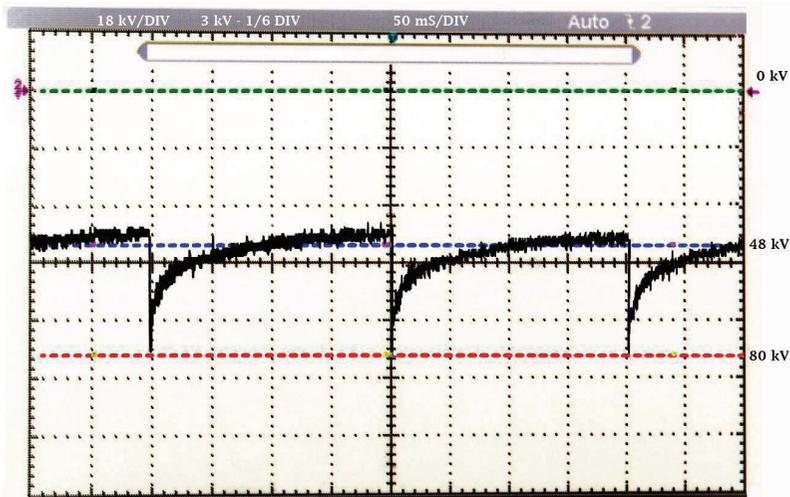


Рисунок 3 – Характерная осциллограмма напряжений и токов на электро-фильтре при наложении импульсной составляющей на постоянное напряжение штатного АП

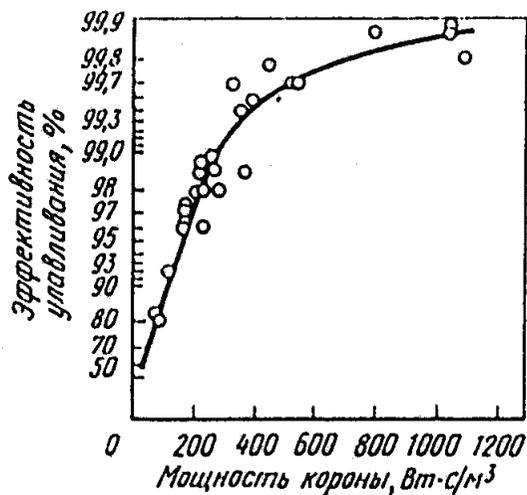


Рисунок 4 – График зависимости эффективности улавливания летучей золы электрофильтром в зависимости от переданной мощности

При комбинированном режиме питания, мощность передаваемая в полу-поле составляет около 10 кВт, что в 40 раз больше, чем при штатном режиме питания. Эффективность электрофильтра по улавливаю выбросов летучей золы зависит от мощности передаваемой в коронный разряд электрофильтра.

На рис. 4 приведен график зависимости эффективности улавливания летучей золы электрофильтром в зависимости от переданной мощности. График получен в результате обработки большого массива информации, полученной при испытаниях многих электрофильтров [3].

**Обобщенные результаты проведенных исследований.** Проведенные натурные испытания позволили создать систему питания электрофильтра постоянным напряжением с наложением на него импульсной составляющей с микросекундной длительностью импульсов. Общее напряжение удалось повысить более чем на 30 кВ при увеличении мощности вводимой в коронный разряд более чем в 40 раз, что приводит к существенному увеличению эффективности улавливания.

В работе также предлагается использовать систему дополнительных коронирующих электродов перед и после основных полей электрофильтра, что открывает возможность проверки электрофизических способов, с использованием наносекундных технологий уменьшения выбросов окислов серы [4] с одновременным увеличением эффективности улавливания летучей золы.

**Выводы.** Использование комбинированного режима питания электрофильтров позволяет существенно увеличить мощность, передаваемую в электрофильтр, что приводит к существенному снижению выбросов летучей золы.

**Список литературы.** 1. Чекалов Л.В. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов. – Ярославль, Русь, 2004. 2. Попков В.И. Электрическое поле при переходной униполярной короне // Известия АН СССР, отделение технических наук. – №7. – 1954. – С. 7-12. 3. Алиев М.А. Электрооборудование и режимы питания электрофильтров. – Москва, Энергия, 1971. – С. 25-29. 4. Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.Н., Казарян Ю.Г., Ярошинский Н.С. Влияние режимов работы высоковольтного источника питания на формирование стримерного коронного разряда и эффективность систем газоочистки // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – Ч. 1. – 2011. – С. 44 - 49.

*Поступила в редколлегию 13.04.2012.*

**Л.З.БОГУСЛАВСКИЙ**, канд. техн. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

**Н.С.НАЗАРОВА**, канд. техн. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

**Л.Е.ОВЧИННИКОВА**, канд. техн. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

**С.С.КОЗЫРЕВ**, канд. техн. наук, Национальный университет кораблестроения, Николаев;

**С.Б.ПРИХОДЬКО**, канд. техн. наук, Национальный университет кораблестроения, Николаев

## **МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА НАНОЧАСТИЦ УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМ СПОСОБОМ**

Розроблено методику побудови аналітичної моделі закону розподілу розмірів синтезованих наночастинок вуглецю та оцінки довірчих інтервалів статистичних моментів негаусовських випадкових величин за експериментальними даними.

An analytical model of the distribution law of size synthesis carbon nanoparticles from the experimental data and an estimate of the confidence intervals of the statistical moments negausovskih random variables based on transformations normalize.

Разработана методика построения аналитической модели закона распределения размеров синтезированных наночастиц углерода и оценки доверительных интервалов статистических моментов негаусовских случайных величин по экспериментальным данным.

**Введение.** Массовое производство углеродсодержащих наноматериалов, которые находят широкое применение в различных областях науки и техники благодаря сочетанию свойств и параметров, недостижимых для традиционных моно- и поли- кристаллических структур, сдерживается несовершенством методов их синтеза [1]. Результаты исследований по применению высокочастотной дуги для синтеза наноуглерода из газообразных сред подтверждают возможность получения твердой углеродной сажи при электроразрядном воздействии на газообразные углеводороды, при этом устраняются трудоемкие операции сушки, очистки и разделения по качественному и фракционному составу полученного наноуглерода. Установлено, что для синтеза наноуглерода из газообразных углеродсодержащих сред необходимо использовать неравновесную плазму, то есть создавать специальные условия синтеза.

Основным препятствием на пути совершенствования способов синтеза наноуглерода в промышленных объемах было отсутствие оборудования, позволяющего гибко менять режимы обработки и условия проведения экспериментальных исследований для отработки оптимальной технологии синтеза, а

также отсутствие средств текущего контроля реакционных параметров и создания базы данных для дальнейшего анализа результатов.

В Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины создана экспериментальная установка для плазмохимического синтеза наноуглерода из газообразного углеродсодержащего сырья посредством его высокочастотной разрядноимпульсной обработки, которая позволяет создавать условия для синтеза материала с заданными свойствами [2]. Разработана система мониторинга процесса синтеза наноуглерода, позволяющая контролировать параметры плазмохимической реакции в реальном времени, создавать базы данных для последующей обработки и анализа с целью синтеза наноматериалов с заданными свойствами [3].

Для построения по результатам экспериментальных данных адекватных зависимостей количественных характеристик углеродных наноматериалов, синтезируемых путем объемной электроразрядной обработки углеродных сред, от входных параметров плазмохимического синтеза необходимо определить закон распределения размеров полученных наночастиц.

**Целью работы** является разработка методики построения аналитической модели закона распределения размера наночастиц, полученных в результате электроразрядной обработки углеродных сред, для дальнейшего использования его при определении условий синтеза наноматериалов с заданными свойствами.

**Построение аналитической модели закона распределения** является способом обобщенного представления экспериментальных данных в тех случаях, когда отсутствует теоретическое обоснование закона распределения случайной величины или функции.

Для описания экспериментальных данных аналитическую модель закона распределения строим, используя распределение Джонсона. Его преимущество по сравнению с распределением Пирсона состоит в том, что после определенных преобразований оно приводит к нормально распределенной случайной величине. Большее количество статистических критериев, методов и оценок разработаны в основном только для случая нормального начального распределения. Это касается и нахождения интервальных оценок характеристик случайной величины, в том числе и статистических моментов, что является наиболее полным и надежным методом оценки.

Для построения аналитической модели закона распределения размера наночастиц углерода по экспериментальным данным и оценки доверительных интервалов статистических моментов разработана программа, позволяющая в полуавтоматическом режиме определить по микрофотографии образца продукта синтеза минимальный и максимальный Feret-диаметры частиц и их площадь (рис.1).

Полученное в результате обработки экспериментальных данных распределение значений размеров наночастиц отличается от нормального. Для определения доверительных интервалов точечных оценок статистических моментов может быть применен специально разработанный подход [4]. Сначала с помощью нормализующего преобразования начальные данные преобразуются

таким образом, чтобы иметь распределение Гаусса (или приближенное к нему). Далее для преобразованных (нормализованных) данных находят оценки доверительных интервалов статистических моментов нормализованной случайной величины. На основе обратного преобразования и найденных оценок вычисляют оценки доверительных интервалов статистических моментов начальной негауссовской случайной величины.

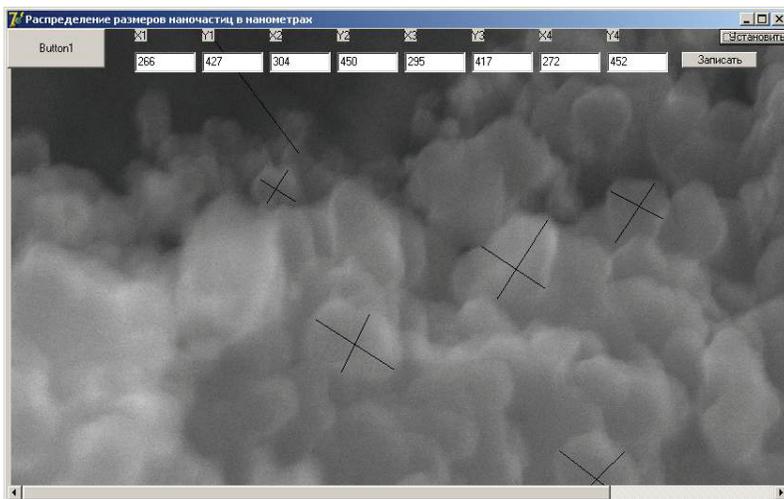


Рисунок 1 – Интерфейс программы для определения размеров наночастиц

Семейства распределений Джонсона отличаются разнообразием форм и плоскости асимметрии в квадрате  $A^2$  и эксцессе  $\epsilon$  и занимают значительные области. На рис. 2 представлена диаграмма Джонсона (области комбинаций  $A^2$  и  $\epsilon$  для разных распределений Джонсона). Эта диаграмма позволяет подобрать семейство распределений Джонсона по значениям оценок  $A^2$  и  $\epsilon$  выборочного распределения [5].

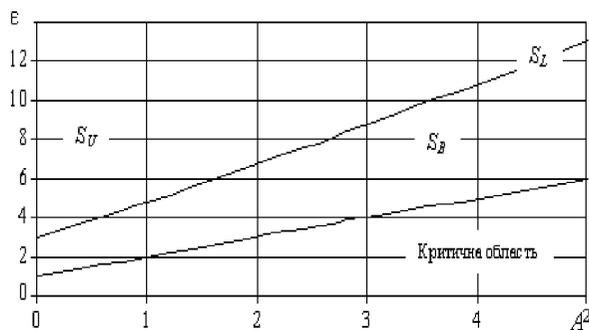


Рисунок 2 – Комбинации  $A^2$  и  $\epsilon$  для разных распределений Джонсона

Практически всегда при подборе аналитической модели закона распределения экспериментальных данных асимметрия  $A$  и эксцесс  $\varepsilon$  не известны. В этом случае выбор семейства распределений Джонсона осуществляется по оценкам асимметрии  $A$  и эксцесса  $\varepsilon$ , которые находятся по гистограмме. После выбора необходимого семейства распределений Джонсона вычисляют его параметры, и выполняют проверку адекватности избранной модели экспериментальным данным по критерию согласия, например, критерию Пирсона ( $\chi^2$ ). В случае, когда эксцесс случайной величины больше трех, то непараметрическая оценка, которая базируется на распределении Гаусса, приводит к увеличению длины доверительных интервалов точечных оценок ее статистических моментов по сравнению с приведенным подходом на основе применения нормализующего преобразования Джонсона.

**Выводы.** Для получения достоверных несмещенных оценок количественных характеристик размеров синтезированных наночастиц предложенным методом достаточно обрабатывать случайную выборку, в три раза меньшую, чем при предположении о нормальности закона распределения, так как закон распределения размеров наночастиц углерода характеризуется большим эксцессом (больше трех).

С применением описанного метода построена аналитическая модель закона распределения размера наночастиц углерода по экспериментальным данным и получена оценка доверительных интервалов статистических моментов негауссовских случайных величин на основе нормализующих преобразований, что является теоретической основой для построения адекватных зависимостей количественных характеристик полученных наночастиц от входных параметров плазмохимического синтеза.

**Список литературы.** 1. *Кускова, Н. И.* Электровзрывные методы синтеза углеродных наноматериалов / *Н. И. Кускова, Л. З. Богуславский, А. Д. Рудь, В. Н. Уваров, Л. И. Ивацук, А. Е. Перекоп, В. И. Орешкин* // Металлофизика и новейшие технологии. – 2008. – Т. 30, № 6. – С. 833-847. 2. *Богуславский, Л. З.* Экспериментальная установка для управляемого плазмохимического синтеза наноглерода из газообразного сырья с системой контроля параметров / *Л. З. Богуславский, Н. С. Назарова, Л. Е. Овчинникова, Д. В. Винниченко; В. В. Диордийчук* // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2011. – Ч. 1. – С. 326-331. 3. *Богуславский, Л. З.* Система мониторинга плазмохимического синтеза наноглерода при высокочастотной разрядноимпульсной обработке газообразного углеродсодержащего сырья / *Л. З. Богуславский, Н. С. Назарова, Л. Е. Овчинникова, Д. В. Винниченко; В. В. Диордийчук* // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Тематический выпуск. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – № 49. – 2011. – Х.: НТУ «ХПИ». – С. 27-35. 4. *Приходько, С. Б.* Інтервальне оцінювання параметрів стохастичних диференціальних систем на основі модифікації узагальненого методу моментів / *С. Б. Приходько* // Матеріали XIII Міжнародної конференції з автоматичного управління, Вінниця, 2007 р. – С. 69-75. 5. *Приходько, С.Б.* Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Обробка експериментальних даних на ЕОМ» / *С.Б. Приходько.* – Миколаїв: НУК, 2005. – 52 с.

*Поступила в редколлегию 12.04.2012.*

**Р.К.БОРИСОВ**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., МЭИ (ТУ), Москва, Россия

## **О ВЫНОСЕ ВЫСОКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ НА ПИТАЮЩЕМ ЦЕНТРЕ**

У статті розглянуті заходи щодо зниження числа відключень споживачів електроенергії в грозовий сезон і часу відновлення електропостачання в розподільних електричних мережах.

The paper describes measures to decrease number of consumer power tripping during thunder season and to decrease power consumption recovery time in distribution power network.

В статье рассмотрены мероприятия по снижению числа отключений потребителей электроэнергии в грозовой сезон и времени восстановления электроснабжения в распределительных электрических сетях.

Развитие энергосистем сопровождается ростом токов короткого замыкания в сетях напряжением 110 кВ и выше. Напряжение на заземляющем устройстве подстанций соответственно также возрастает. В связи с этим возникает опасность выноса высокого потенциала в сети 0,4 кВ к потребителю электроэнергии, что приводит к нарушению условий электробезопасности и надежной работы электроприборов.

В распределительных сетях (РС) к питающим центрам (ПЦ) относятся электрические подстанции напряжением 35-220 кВ.

В сетях 35 кВ, как правило, нейтраль не заземляется, и при однофазном замыкании на землю через заземляющее устройство (ЗУ) подстанции протекают небольшие токи. Напряжение на ЗУ устройстве таких подстанций не высокое (менее 5 кВ).

Проблема выноса высокого потенциала с ЗУ подстанций напряжением 110кВ и выше при коротком замыкании (КЗ) на землю далеко не новая. В [1] в главе 1.7 рассматриваются два случая выноса потенциала: при питании по сети 0,4кВ (собственные нужды) внешнего потребителя электроэнергии и по отходящим коммуникациям (трубопроводы различного назначения, рельсовые пути, металлоконструкции, экраны, броня и оболочки кабелей 6-20 кВ).

В первом случае в соответствии с требованиями [1, 2] питание внешних потребителей должно осуществляться через разделительный трансформатор. Допускается также выполнять питание внешних потребителей от трансформатора с изолированной нейтралью на стороне 0,4 кВ по кабельной линии без металлической оболочки и без брони, или по воздушной линии.

Второй случай выноса высокого потенциала с ЗУ ПЦ на РП, ТП и, в конечном счете, к потребителю электроэнергии (П) хотя и рассматривается в нормативных документах, но мероприятий по защите от выноса потенциала не предусмотрено. В [1, 2] указывается, что напряжение на заземляющем устройстве ПЦ при стекании с него тока замыкания на землю не должно, как прави-

ло, превышать 10 кВ. Напряжение 10 кВ допускается на заземляющих устройствах подстанций напряжением 110 кВ и выше, с которых исключен вынос потенциалов за пределы зданий и внешних ограждений электроустановок. При напряжении на заземляющем устройстве ПЦ более 5 кВ должны быть предусмотрены меры по защите изоляции отходящих кабелей связи и телемеханики и по предотвращению выноса опасных потенциалов за пределы электроустановки.

Следует заметить, что на практике встречаются и другие случаи, не указанные в нормативных документах. Например, нередко на переходные пункты (ПП) напряжением 110-220 кВ питание 0,4 кВ для вторичного оборудования подается от внешнего источника, от трансформаторной подстанции (ТП), расположенной за территорией переходного пункта. В этом случае, при КЗ на землю на ПП из-за заноса нулевого потенциала по кабелям 0,4 кВ происходит повреждение вторичного оборудования на ПП. Для таких случаев следует применять указания [1, 2] по защите от выноса потенциала: применять раздельный трансформатор для питания оборудования ПП по 0,4 кВ от ТП.

Что касается защиты изоляции кабелей связи и телемеханики, то здесь имеется, по крайней мере, два решения. На практике давно применяются специальные устройства для таких кабелей, которые позволяют устранить опасность повреждения изоляции при КЗ. В настоящее время более распространено применение оптоволоконных линий связи, для которых высокое напряжение на ЗУ подстанции не представляет опасности. Вынос потенциала по трубопроводам различного назначения устраняется применением современных труб из непроводящих материалов.

Остается одна не решенная проблема: вынос высокого потенциала по кабельным линиям (экран, оболочка и броня).

Схема выноса потенциала по кабельным линиям приведена на рис. 1, а схема замещения на рис. 2.

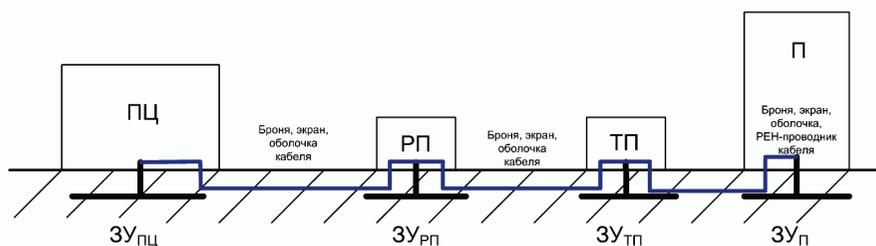


Рисунок 1 – Схема выноса потенциала по кабельным линиям от ПЦ до потребителей электроэнергии

Почему проблема выноса высокого потенциала с ПЦ стала особенно актуальной в настоящее время? Основная причина состоит в том, что в энергосистемах идет постоянный рост токов КЗ на землю. В настоящее время на некоторых подстанциях токи КЗ на землю превышают 60 кА. В ОАО «МОЭСК» принято решения устанавливать выключатели с разрывной способностью

50кА. Вторая причина состоит в том, что в городских условиях из-за отсутствия больших свободных земельных участков все чаще строятся подстанции с закрытым распределительным устройством (ЗРУ) или с подстанции с распределительным устройством с элегазовой изоляцией (КРУЭ).

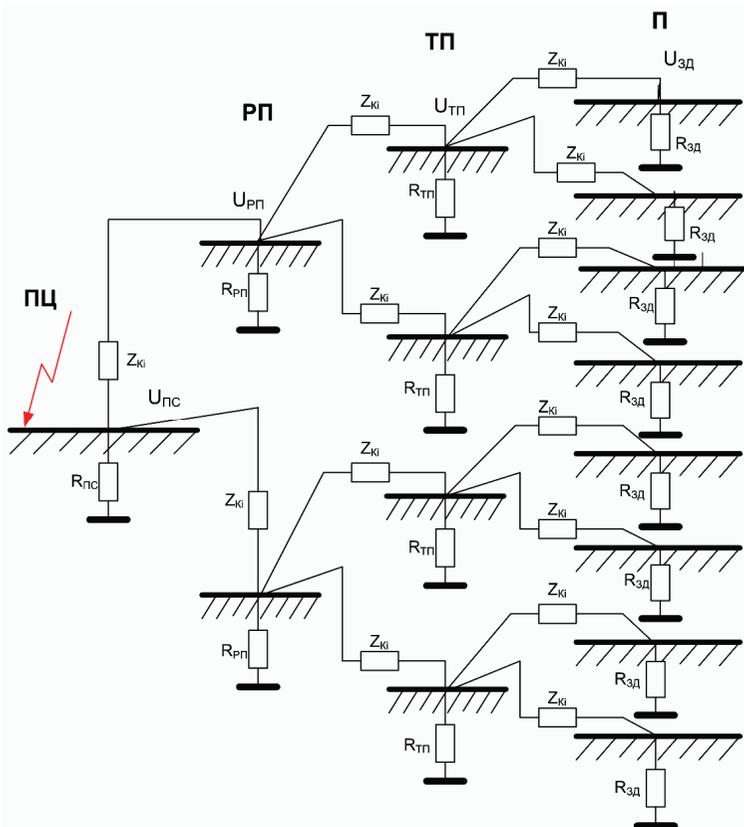


Рисунок 2 – Схема замещения выноса потенциала по кабельным линиям

Чтобы обеспечить напряжение на ЗУ ПЦ менее 5 кВ ( в соответствии с требованиями [1]) при токе КЗ 50 кА необходимо выполнить ЗУ с сопротивлением менее 0,1 Ом.

Рассмотрим, насколько возможно это сделать на практике По упрощенной формуле сопротивление ЗУ можно определить, как:

$$R_{3y} = 0,44\rho/\sqrt{S},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление грунта;  $S$  – площадь ЗУ.

Для современных подстанций с КРУЭ площадь ЗУ, как правило, не превышает 100 м<sup>2</sup>. Удельное сопротивление грунта верхнего слоя должно приниматься с учетом наиболее неблагоприятных климатических условий. Эквива-

лентное удельное сопротивление грунта обычно не менее  $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Отсюда ясно, что только горизонтальными заземлителями мы обеспечим сопротивление ЗУ существенно больше  $0,1 \text{ Ом}$ .

Для снижения сопротивления ЗУ применяются глубинные скважные заземлители. Они эффективны лишь тогда, когда достигаются слои с низким удельным сопротивлением грунта. Если этого не происходит, то фактически глубинные заземлители лишь несколько увеличивают площадь стекания тока с ЗУ. Даже если с помощью глубинного заземлителя достигаются слои с низким удельным сопротивлением, при ограниченной площади подстанции, а следовательно и ЗУ, сопротивление менее  $0,1 \text{ Ом}$  не получается.

Так, например, динамическое сопротивление глубинного заземлителя длиной  $100 \text{ м}$  составит чуть менее  $0,5 \text{ Ом}$  при удельном сопротивлении грунта (приведенном к двухслойной модели): верхний слой  $200 \text{ Ом}$ , нижний слой  $20 \text{ Ом}$ , глубина раздела слоев  $1,5 \text{ м}$ . При размерах подстанции  $100 \times 100 \text{ м}^2$  можно установить четыре глубинных заземлителя. При этом коэффициент использования будет примерно  $0,8$ . Сопротивление ЗУ составит более  $0,1 \text{ Ом}$ . Большое количество глубинных заземлителей не даст ожидаемого эффекта, так как коэффициент использования будет уменьшаться.

Практика проектирования ЗУ показала, что даже применение скважных глубинных заземлителей не позволяет снизить сопротивление ЗУ до  $0,1 \text{ Ом}$ . В большинстве случаев напряжение на ЗУ современных ПЦ превышает  $5 \text{ кВ}$ . Применение выносного заземлителя в городских условиях невозможно. В этом случае происходит вынос высокого потенциала с ЗУ ПЦ.

Третьей причиной проблемы выноса высокого потенциала с ПЦ к потребитель является применение кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СШП) с экранами из меди большого сечения.

Высокий потенциал может снижен на РП из-за падения напряжения на сопротивлении ЗКі кабельных линий (см. рис. 2). Ранее, когда применялись кабели  $6-10 \text{ кВ}$  с бумажно-масляной изоляцией, с броней и оболочкой, обычно так и происходило. Во-первых сопротивление свинцовой или алюминиевой оболочки и брони было относительно высокое, а во-вторых защитный покров не являлся изоляционным материалом. В результате выносимый с ЗУ ПЦ потенциал распределялся равномерно по длине кабеля, и происходило частично стекание тока с брони по длине кабеля. То есть кабель выполнял функцию дополнительного протяженного заземлителя.

Сопротивление экрана кабеля из СШП существенно ниже. Высокий потенциал с ЗУ ПЦ практически без снижения выносится на РП и далее на ТП.

При этом возникают дополнительные проблемы с обеспечением электробезопасности и ЭМС на ТП и РП.

Рассмотрим реальный пример выноса потенциала с одного из ПЦ. При проектировании ЗУ на ПЦ напряжением  $220/20 \text{ кВ}$  с большим трудом (применяются глубинные скважные заземлители до  $100 \text{ м}$ ) обеспечено напряжение на ЗУ  $8,2 \text{ кВ}$ . Сопротивление ЗУ равно  $0,13 \text{ Ом}$ . На расстоянии  $500 \text{ м}$  расположено ТП с ЗУ сопротивлением  $0,5 \text{ Ом}$  (по данным эксплуатирующей организации). По экранам кабелей (три фазы – пофазно) выносится потенциал  $8 \text{ кВ}$  на

ТП. На расстоянии 100 м расположено здание питающееся от ТП. Сопротивление ЗУ здания за счет системы уравнивания потенциалов составляет 0,1 Ом. Напряжение на ЗУ – 6 кВ. При этом по экранам кабелей из сшитого полиэтилена протекает ток 15 кА, а по нулевым проводникам кабелей 0,4кВ - 6 кА.

Согласно требованиям [1] сопротивление ЗУ в сети с изолированной нейтралью должно быть:

$$R_{\text{ТП}} \leq 250 / I,$$

где I - расчетный ток замыкания на землю, который должен быть определен для той из возможных в эксплуатации схем сети, при которой этот ток имеет наибольшее значение. При токе 9 кА, протекающим через ЗУ ТП сопротивление должно быть не более 0,028 Ом. Такого сопротивления мы не обеспечим никогда. Следовательно напряжение на ЗУ будет выше существенно 250 В и электробезопасность не обеспечивается. Причем, согласно требованиям [3] вне ТП мы должны обеспечить напряжение прикосновения и шага для населения не более 12 В.

В [4] установлено требование по наибольшему напряжению на ЗУ в электроустановках 0,4кВ при выносе потенциала в зависимости от времени отключения КЗ (см. таблицу).

Допустимые значения напряжений на изоляции 0,4 кВ

Допустимое критическое напряжение на оборудовании электроустановки до 1 кВ, В	Время отключения, с
$U_0 + 250$	Св. 5
$U_0 + 1200$	До 5

Эти требования на ТП не обеспечиваются.

У потребителя в здании мы не сможем обеспечить уравнивание потенциалов до безопасных значений для людей и оборудования. Кроме того, в здания приходят различные коммуникации, и существует большая вероятность повреждения оборудования.

Так, например, На одной из ПС произошло КЗ на землю в кабельном канале на кабелях 110 кВ. В расположенном на расстоянии примерно 200 м от ПС здании произошло повреждение мощных ИБП и другого оборудования.

### Заключение

Проблему выноса потенциалов при КЗ на землю на ПЦ необходимо решать.

Сложность в решении этой проблемы еще в том, что проектирование и эксплуатация ЗУ ПЦ, РП, ТП и электроустановок потребителей осуществляется обычно различными организациями. Решая локальную задачу обеспечения требований по сопротивлению ЗУ и напряжению на ЗУ для отдельного из указанных объектов, проектировщики в настоящее время исключают из рассмотрения вопрос о выносе потенциала.

Необходимо провести расчетно-экспериментальные исследования на типовых объектах и разработать эффективные мероприятия по защите от выноса

больших токов и потенциалов. Результаты таких исследований позволят ввести коррективы по защите от выноса потенциалов в действующие нормативные документы.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

**Список литературы:** 1. Правила устройства электроустановок. Издание седьмое. 2. СТО 56947007-29.130.15.114-2012. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6-750 кВ переменного тока. 3. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. ИПК Издательство стандартов, 1982. – С дополнениями и изменениями от 24.12.87 г. 4. ГОСТ 50571.18-2000 (МЭК 60364-4-442-93). Ч.4. Требования по обеспечению безопасности. Раздел 442. Защита электроустановок до 1кВ от перенапряжений, вызванных замыканиями на землю в электроустановках выше 1кВ. – М.: Изд-во стандартов, 2000.

*Поступила в редколлегию 12.03.2012.*

УДК 539.22:621.317

**В.В.ВЫТРИШКО**, мл. науч. сотр, НТУ «ХПИ»;  
**О.Л.РЕЗИНКИН**, канд. техн. наук, зав. каф., НТУ «ХПИ»;  
**Е.В.ХРИСТИЧ**, аспирант, НТУ «ХПИ»

### **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СЕГНЕТОКЕРАМИК $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ ДОПИРОВАННЫХ Zr, Pb И Sn В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ**

За визначеними вимогами розроблено дев'ять складів зразків сегнетокераміки, придатної для використання в сильних електричних полях. Експериментально досліджена залежність диференційної діелектричної проникності та електричної індукції отриманої сегнетокераміки від напруженості прикладеного електричного поля промислової частоти при різних температурах.

Several compositions of ferroelectric ceramics for high voltage applications are elaborated. Results of experimental investigation of dielectric behavior of elaborated ferroceramics samples upon strong AC electric fields are discussed.

По определенным требованиям разработано девять составов образцов сегнетокерамики, пригодной для использования в сильных электрических полях. Экспериментально исследована зависимость дифференциальной диелектрической проницаемости и электрической индукции полученной сегнетокерамики от напряженности приложенного электрического поля промышленной частоты при различных температурах

Интенсивное развитие микропроцессорной техники, снижение весогабаритных параметров применяемых электронных устройств, развитие нанотехнологий постоянно выдвигает все новые требования к используемым материа-

лам. Одним из перспективных и достаточно широко используемых в электронике материалов являются сегнетоэлектрики [1-3]. Сегнетоэлектрики нашли широкое применение для изготовления малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной емкостью. Кроме того, обладая большой нелинейностью поляризации данные материалы используются для создания диэлектрических усилителей, модуляторов и других управляемых устройств. Перспективным является использование сегнетоэлементов в счетно-вычислительной технике в качестве ячеек памяти, для создания микропроцессоров. Кристаллы сегнето- и антисегнетоэлектриков применяются для модуляции и преобразования лазерного излучения и т.д. Кроме этого совершенствование технологии изготовления делает возможным продвижение материалов, обладающих сегнетоэлектрическими свойствами в силовую электронику для создания мощных генераторов электрических и магнитных полей [4-6]. В этом направлении интенсивно ведутся работы по созданию материалов, имеющих высокую нелинейность диэлектрической проницаемости, низкие диэлектрические потери, высокую электрическую и механическую прочность. Данные материалы сделают возможным создание генераторов и обострителей электрического и магнитного полей способных развивать большую мощность на низкоомной нагрузке [7-9].

Одним из методов получения сегнетоэлектрических материалов, обладающих требуемыми свойствами в заданном температурном интервале, является технология высокотемпературного синтеза твердых растворов титанатов бария и стронция. Изменением концентрации компонентов и введением добавок в твердый раствор можно регулировать значения диэлектрической проницаемости, смещать температуру фазового перехода (температуру Кюри), изменять нелинейность поляризации и т. д.

Учитывая перспективность использования сегнетоэлектриков в качестве рабочего тела высоковольтных формирующих устройств были изготовлены и исследованы 9 составов образцов сегнетокерамики. Основной кристаллической фазой в разрабатываемых материалах являются твердые растворы системы  $\text{SrO} - \text{BaO} - \text{TiO}_2$ . К разрабатываемой сегнетокерамике предъявлялись следующие требования: высокое значение относительной диэлектрической проницаемости (порядка нескольких тысяч); высокая нелинейность поляризации; высокая электрическая прочность; низкие диэлектрические потери; малое время релаксации; температура Кюри должна составлять 40-50 °С; механическая прочность и возможность изготовления массивных однородных конструкций, пригодных для использования в мощных формирователях напряжения и тока. В таблице представлен химический состав разработанных образцов сегнетокерамики.

Все образцы сегнетокерамики формовались методом сухого прессования под давлением 100-120 кгс/см<sup>2</sup> с последующим обжигом при температуре 1350 °С. Образцы имеют форму цилиндра диаметром 25-30 мм и толщиной 4-5 мм. Свежеприготовленные образцы шлифовались до получения заданной толщины (3-4 мм), затем с помощью токопроводящей пасты на них наносились электроды. Для экспресс оценки соответствия свойств получаемых образцов выдвину-

тым ранее требованиям, проводилось исследование свойств сегнетокерамики при действии на них синусоидального напряжения промышленной частоты. Для этого был создан экспериментальный стенд, основанный на использовании метода Сойера – Тауэра [10]. Схема стенда приведена на рис. 1.

Химический состав разработанных образцов сегнетокерамики

№ образца	Химический состав
№ 5	$Ba_{0,86}Sr_{0,12}TiO_3$ ; $BaTiO_3$ – 88 г, $SrTiO_3$ – 12 г
№ 6	$Ba_{0,88}Sr_{0,12}TiO_3$ ; $BaCO_3$ – 76,42 г, $SrCO_3$ – 7,79 г, $TiO_2$ – 35,15 г
№ 7	вторичный обжиг сырьевой смеси № 6
№ 12	сырьевая смесь № 6 + 1 % добавка (50 % $BaSnO_3$ + 50 % $SrSnO_3$ )
№ 14	сырьевая смесь № 6 + 3 % добавка (50 % $BaSnO_3$ + 50 % $SrSnO_3$ )
№ 15	сырьевая смесь № 6 + 1 % добавка (50 % $BaZrO_3$ + 50 % $SrZrO_3$ )
№ 16	сырьевая смесь № 6 + 2 % добавка (50 % $BaZrO_3$ + 50 % $SrZrO_3$ )
№ 17	сырьевая смесь № 6 + 3 % добавка (50 % $BaZrO_3$ + 50 % $SrZrO_3$ )
№ 22	сырьевая смесь № 6 + добавка (95 % $BaZrTi$ + 5 % $SrZrPbTi$ )

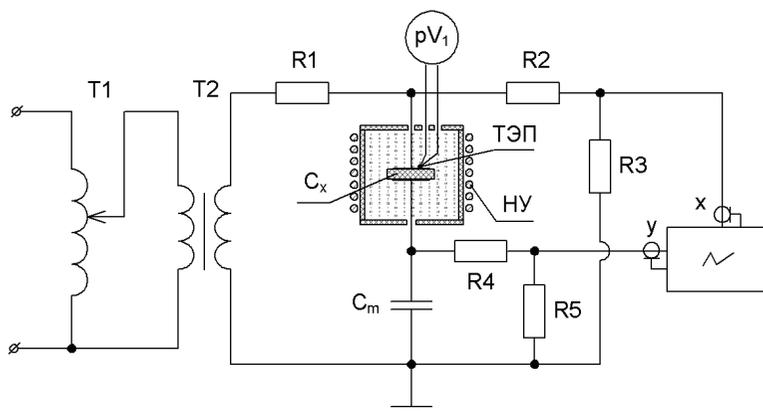


Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда для исследования свойств сегнетоэлектриков на частоте 50 Гц

В данной схеме исследуемый образец  $C_x$  включен последовательно с измерительной емкостью  $C_m$ , поскольку  $C_m \gg C_x$ , напряженность электрического поля  $E(t)$  в исследуемом образце можно считать пропорциональной мгновенному значению напряжения  $U_{Cx}(t)$  на всей последовательной цепочке. Измерения проводились цифровым двухканальным осциллографом FLUKE 105B. В измерительной цепи регистрации напряжения на образце  $U_{Cx}(t)$  установлен высоковольтный делитель R2-R3, имеющий коэффициент деления 1:10000. Регистрация напряжения  $U_{Cm}(t)$  на измерительной емкости  $C_m$  проводилась посредством делителя R4-R5, с коэффициентом деления

1:100. Высокое напряжение от высоковольтного трансформатора Т2 через защитный резистор R1 подавалось на последовательную цепочку емкостей. Для исследования зависимости  $\varepsilon = f(E)$  действующее значение испытательного напряжения, прикладываемого к образцам, не превышало 5 кВ.

Исследуемые образцы сегнетокерамики помещались в термокамеру в которой с помощью нагревательного устройства НУ поддерживалась заданная температура. Исследования экспериментальных образцов сегнетокерамики проводились при температурах 25-80 °С.

Результаты измерений с помощью цифрового осциллографа записывались в компьютер, где с помощью разработанного ранее алгоритма [11] проводилась апросимация полученных экспериментальных кривых, рассчитывались значения дифференциальной диэлектрической проницаемости и электрической индукции для каждого экспериментального состава образцов при различных температурах. Исследовались по 4-6 образцов каждого из составов; разброс параметров образцов был в пределах погрешности эксперимента.

Для оценки нелинейных свойств исследуемых образцов используем ряд параметров, таких как: напряженность переменного электрического поля  $E_{\text{макс}}$  при которой наблюдается максимальное значение дифференциальной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\text{макс}}$ ; коэффициент нелинейности дифференциальной диэлектрической проницаемости  $K$ , равный отношению максимальной дифференциальной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\text{макс}}$  к ее минимальному значению  $\varepsilon_{\text{мин}}$ . Известно, что площадь петли сегнетоэлектрического гистерезиса пропорциональна энергии, теряемой в образце за один цикл изменения поля. Эта энергия идет, в конечном счете, на нагревание образца. Такие потери энергии называются гистерезисными. Потери на гистерезис в разрабатываемой нами сегнетокерамике являются крайне нежелательными, так как свойства данных материалов имеют сильную зависимость от температуры. Для анализа сегнетоэлектрического гистерезиса исследуемых образцов использованы такие параметры как остаточная индукция электрического поля  $D_{\text{ост}}$  (при  $E = 0$ ), значение поля  $E_{Kt}$  (коэрцитивное поле) при котором происходит переполяризация диэлектрика.

На рис. 2 представлены зависимости дифференциальной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  – (а) и электрической индукции  $D$  – (б) от напряженности приложенного электрического поля для образцов № 5.

Данные образцы имеет наибольшее значение дифференциальной диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon_{\text{макс}} = 10400$ ) при сравнительно большой напряженности поля  $E_{\text{макс}} = 2,4 \times 10^5$  В/м. Однако, значение минимальной дифференциальной диэлектрической проницаемости также является достаточно высоким ( $\varepsilon_{\text{мин}} = 3400$ ), коэффициент нелинейности  $K = 3,1$ . Температура Кюри у этого материала  $T_K = 50$  °С, что вполне удовлетворяет выдвинутым нами требованиям. Существенным недостатком данных образцов является относительно большие потери на гистерезис ( $D_{\text{ост}} = 2 \times 10^{-2}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $E_{Kt} = 2,4 \times 10^5$  В/м), что приводит к сильному саморазогреву материала.

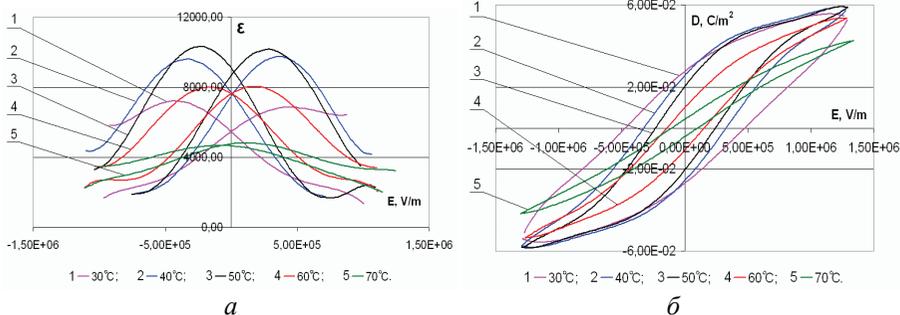


Рисунок 2 – Зависимости дифференциальной диэлектрической проницаемости (а) и электрической индукции (б) от напряженности приложенного электрического поля для образцов № 5

С целью уменьшения гистерезисных потерь было произведено корректирование состава сегнетокерамики и изготовлены образцы № 6. Зависимости дифференциальной диэлектрической проницаемости (а) и электрической индукции (б) от напряженности приложенного электрического поля для данных образцов представлены на рис. 3. Температура Кюри составляет 40 °С, при этом значения диэлектрической проницаемости имеют невысокие значения ( $\epsilon_{\text{макс}} = 4600$ ,  $\epsilon_{\text{мин}} = 2300$ ,  $K = 2$ ). Максимального значения диэлектрическая проницаемость достигает в области более сильных электрических полей  $E_{\text{макс}} = 3,7 \times 10^5$  В/м.

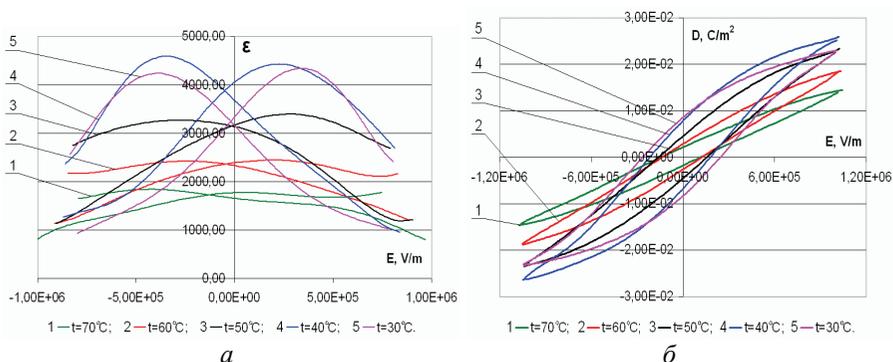


Рисунок 3 – Зависимости дифференциальной диэлектрической проницаемости (а) и электрической индукции (б) от напряженности приложенного электрического поля для образцов № 6

Однако, как и образцы № 5, образцы № 6 имеют большие потери на гистерезис ( $D_{\text{ост}} = 8,2 \times 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $E_{\text{Кт}} = 7,8 \times 10^5$  В/м). Кроме того, полученные образцы имеют достаточно низкую механическую прочность, в результате чего при обработке в некоторых образцах появлялись трещины. Данное обстоя-

тельство отрицательно сказывается и на электрической прочности получаемых образцов.

Для улучшения прочностных характеристик, а также изменения внутренней структуры получаемого твердого раствора, был проведен вторичный обжиг сырьевой смеси № 6. В результате были получены образцы № 7.

Как видно из полученных зависимостей  $\epsilon$  и  $D$ , представленных на рис. 4, нелинейные свойства полученного материала заметно улучшились. Максимальное значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\text{макс}} = 9200$  достигнуто в более низком электрическом поле  $E_{\text{макс}} = 1,4 \times 10^5$  В/м. Коэффициент нелинейности  $K = 2,5$  ( $\epsilon_{\text{мин}} = 3700$ ). Кроме того, у данных образцов заметно снизились потери на гистерезис ( $D_{\text{ост}} = 1 \times 10^{-2}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $E_{\text{Кт}} = 3,7 \times 10^5$  В/м). Температура Кюри данного материала составляет 45 °С, образцы имеют достаточно плотную структуру, что положительно сказывается на возможности их дальнейшей механической обработки и нанесения электродов.

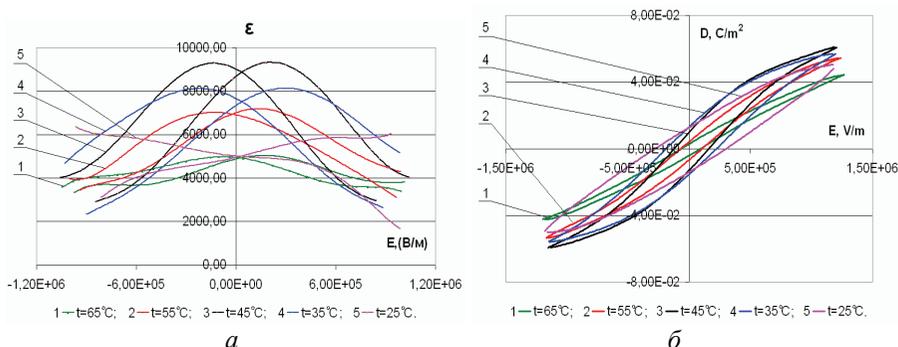


Рисунок 4 – Зависимости дифференциальной диэлектрической проницаемости (а) и электрической индукции (б) от напряженности приложенного электрического поля для образцов № 7

В ходе дальнейших исследований предпринимались попытки улучшения прочностных характеристик образцов № 6 путем введения в первичную сырьевую смесь связующих компонентов, таких как поливинилацетат (образцы №8). Также в первичную сырьевую смесь № 6 добавлялся 0,3 % раствор  $Al(NO_3)_3$  (образцы № 9). Однако, низкая механическая и электрическая прочность полученных образцов делала не целесообразным их дальнейшее исследование.

В ходе дальнейшей разработки сегнетоэлектрических материалов, пригодных для использования в высоковольтных формирующих устройствах, сырьевая смесь № 6 допировалась различными добавками. В образцах № 12 в состав №6 вводилась 1% добавка  $(BaSr)SnO_3$ . У полученного материала (см. рис. 5, а, б) оказалась низкая диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon_{\text{макс}} = 3200$ ), низкая нелинейность  $K = 1,45$  ( $\epsilon_{\text{мин}} = 2200$ ).

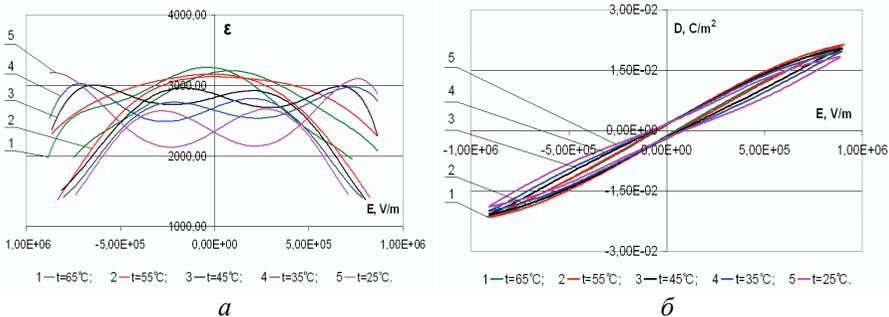


Рисунок 5 – Зависимости дифференциальной диэлектрической проницаемости (а) и электрической индукции (б) от напряженности приложенного электрического поля для образцов № 12

У данного материала практически не наблюдается сегнетоэлектрический гистерезис, наблюдается низкое значение остаточной индукции  $D_{\text{ост}} = 1,4 \times 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>, коэрцитивного поля  $E_{\text{Кт}} = 3,2 \times 10^4$  В/м. Температура Кюри составляет  $65^\circ\text{C}$ .

В образцах № 13 в сырьевую смесь №6 вводилась 2 %, а в образцах № 14 – 3 % добавка  $(\text{BaSr})\text{SnO}_3$ . Как видно из зависимостей, полученных для образцов № 14 (см. рис. 6), это привело к еще большему снижению диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{\text{макс}} = 1800$ ,  $\epsilon_{\text{мин}} = 950$ ). При этом снизилась до  $35^\circ\text{C}$  температура Кюри и появился более выраженный гистерезис ( $D_{\text{ост}} = 1,7 \times 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $E_{\text{Кт}} = 1,2 \times 10^5$  В/м). Дальнейшие эксперименты с добавкой  $(\text{BaSr})\text{SnO}_3$  были прекращены.

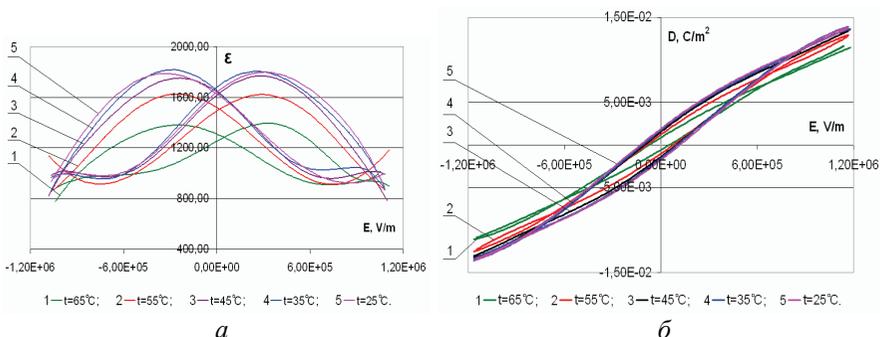


Рисунок 6 – Зависимости дифференциальной диэлектрической проницаемости (а) и электрической индукции (б) от напряженности приложенного электрического поля для образцов № 14

Состав № 15 был получен путем добавления в сырьевую смесь № 6 1 % добавки  $(\text{BaSr})\text{ZrO}_3$ . Полученные экспериментальные кривые для данного материала приведены на рис. 7.

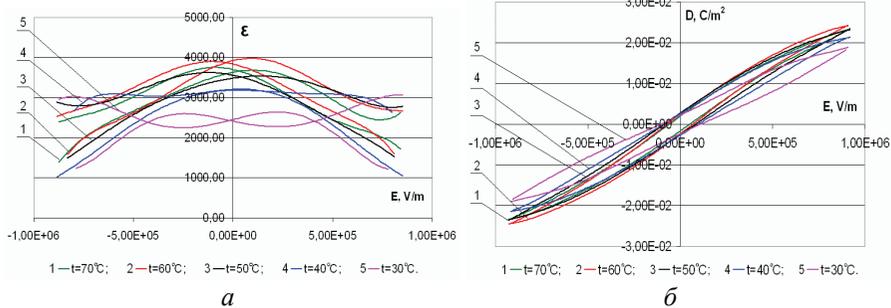


Рисунок 7 – Зависимости дифференциальной диэлектрической проницаемости (а) и электрической индукции (б) от напряженности приложенного электрического поля для образцов № 15

Полученный материал имеет большее, по сравнению с образцами № 12–14, значение дифференциальной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{\text{макс}} = 3980$ ,  $\epsilon_{\text{мин}} = 2600$ ) при относительно не высоком значении напряженности поля ( $E_{\text{макс}} = 9,7 \times 10^4$  В/м). При этом данный материал имеет низкие гистерезисные потери ( $D_{\text{ост}} = 2,4 \times 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $E_{\text{Кт}} = 6,5 \times 10^4$  В/м). К недостаткам данного материала можно отнести сравнительно большое значение температуры Кюри  $T_K = 60$  °С.

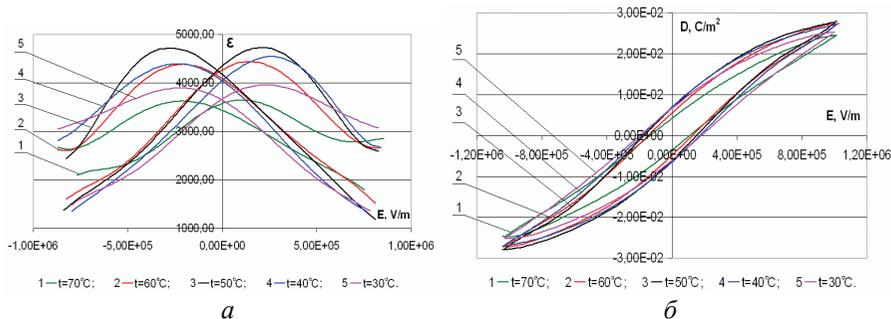


Рисунок 8 – Зависимости дифференциальной диэлектрической проницаемости (а) и электрической индукции (б) от напряженности приложенного электрического поля для образцов № 16

В ходе дальнейших исследований в сырьевую смесь № 6 была введена 2 % добавка  $(BaSr)ZrO_3$ . Полученные в результате образцы № 16 (см. рис. 8) имеют более высокое значение диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{\text{макс}} = 4750$ ,  $\epsilon_{\text{мин}} = 2500$ ) при напряженности поля  $E_{\text{макс}} = 2 \times 10^5$  В/м. Однако, потери на гистерезис тоже немного увеличились ( $D_{\text{ост}} = 7 \times 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $E_{\text{Кт}} = 2 \times 10^5$  В/м). Положительным в данном составе является снижение температуры Кюри  $T_K = 50$  °С.

В образцах № 17 в сырьевую смесь № 6 была введена 3 % добавка

(BaSr)ZrO<sub>3</sub>. Это привело к повышению диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика (см. рис. 9) ( $\epsilon_{\text{макс}} = 6000$ ), к снижению значения минимальной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{\text{мин}} = 2080$ ) и, следовательно, к повышению нелинейности керамики  $K = 2,88$ . Немного снизились потери на гистерезис ( $D_{\text{ост}} = 5,8 \times 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $E_{\text{кт}} = 1,06 \times 10^5$  В/м) и температура Кюри  $T_{\text{к}} = 45$  °С.

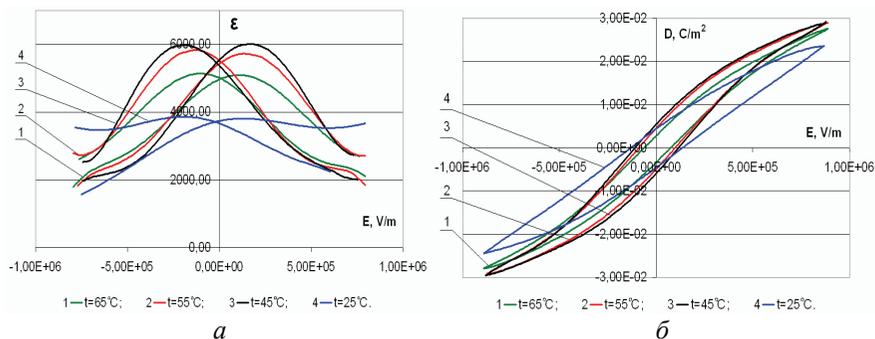


Рисунок 9 – Зависимости дифференциальной диэлектрической проницаемости (а) и электрической индукции (б) от напряженности приложенного электрического поля для образцов № 17

При дальнейшем совершенствовании состава сегнетокерамики в сырьевую смесь № 6 вводилась добавка: 95 % BaZrTi + 5 % SrZrPbTi. В результате были получены образцы № 22.

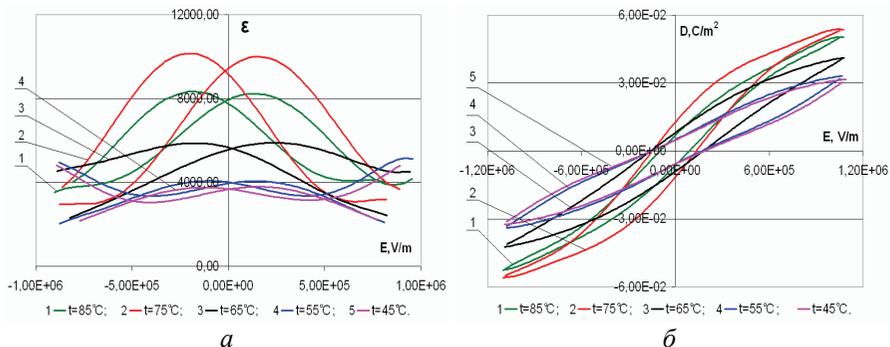


Рисунок 10 – Зависимости дифференциальной диэлектрической проницаемости (а) и электрической индукции (б) от напряженности приложенного электрического поля для образцов № 22

Экспериментально полученные зависимости  $\epsilon$  и  $D$  для данных образцов представлены на рис. 10. В данных образцах наблюдается значительное увеличение значения максимальной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\text{макс}} = 10000$ , при сравнительно не высоком значении минимальной диэлектрической про-

нищаемости  $\varepsilon_{\text{мин}} = 2950$ . Данный материал имеет наибольшую среди исследуемых нами образцов нелинейность диэлектрической проницаемости  $K = 3,4$ .

Потери на гистерезис в данных образцах имеют меньшее, по сравнению с образцами № 5, значение ( $D_{\text{ост}} = 1,3 \times 10^{-2}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $E_{\text{кт}} = 1,5 \times 10^5$  В/м). Однако, данный материал имеет и самое большое значение температуры Кюри  $T_{\text{к}} = 75$  °С.

Учитывая приведенные выше требования, наиболее перспективными для дальнейшего исследования и использования в высоковольтных устройствах являются образцы сегнетокерамики № 7 и № 22, так как имеют достаточно высокое значение  $\varepsilon$ , высокую нелинейность поляризации, достаточно низкие диэлектрические потери. Хотя, для уменьшения температуры Кюри, с целью облегчения использования подобных материалов в реальных устройствах, возможно, необходима небольшая корректировка состава или технологии изготовления образцов № 22. Образцы № 7 и № 22 механически достаточно прочные, что позволяет проводить их механическую обработку.

**Список литературы:** 1. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики / Смоленский Г. А., Боков В. А., Исунов В. А., Крайник Н. Н., Пасынков Р. Е., Шур М. С. – Л.: Наука, 1971. – 476 с. 2. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Под ред. О. Г. Вендика. – М.: Сов. Радио, 1979. – 272 с. 3. Богатырев Ю. К. Импульсные устройства с нелинейными распределенными параметрами. – М.: Сов. радио, 1974. – 280 с. 4. Мезяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М.: Сов. радио, 1974. – 256 с. 5. Гапонов А. В., Островский Л. А., Фрейдман Г. И. Ударные электромагнитные волны // Изв. высш. уч. зав., радиофизика. – 1967. – Т. 10. № 9-10. – С. 1376-1413. 6. N. Seddon, E. Thornton. A high-voltage, short-risetime pulse generator based on a ferrite pulse sharpener // Rev. Sci. Instrum. – 1988. – 59. No. 11. – PP. 2497-2498. 7. О. Л. Резинкин, Г. В. Лисачук, В. В. Вытришко Использование нелинейности электрофизических свойств сегнетокерамики для генерирования мощных ударных электромагнитных волн // Технічна електродинаміка. Тем. випуск, «Силова електроніка та енергоефективність». – 2005. – Ч. 4. – С. 100-103. 8. О. Л. Резинкин, Г. В. Лисачук, В. В. Вытришко Методика исследования электрических свойств сегнетокерамик на основе титаната бария в сильных электрических полях // Техн. електродинаміка. Тем. випуск – «Силова електроніка та енергоефективність». – 2006. – Ч. 3. – С. 23–26. 9. О. Л. Резинкин, В. В. Вытришко Методика экспериментального исследования свойств сегнетоэлектриков в импульсных электрических полях // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – № 17. – С. 112-120. 10. Sawyer C. B., Tower C. N. Phys. Rev. – 1930. – 85, 269. 11. О. Л. Резинкин, А.-К. Axelsson, В. В. Вытришко Стенд для исследования динамики импульсной поляризации нелинейных диэлектриков // ПТЭ. – 2010. – № 5. – С. 142-148.

*Поступила в редколлегию 05.03.2012.*

*О.Ю.ГЛЕБОВ*, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В КАБЕЛЯХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМКНИИ НА ШИНАХ ПОДСТАНЦИИ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

В статті наведено розрахункові схеми та математичні вирази щодо визначення рівнів електромагнітних завод в кабелях вимірювальних трансформаторів напруги при короткому замиканні на шинах підстанції з метою забезпечення електромагнітної сумісності на енергетичних об'єктах.

For the purpose to provide the electromagnetic compatibility of substation, there are an analytical models and mathematical equations for determination of electromagnetic disturbance into voltage measuring transformer cables during short circuit on high-voltage buses are given in the paper.

В статье приведены расчетные схемы и математические выражения для определения уровней электромагнитных помех в кабелях измерительных трансформаторов напряжения при коротком замыкании на шинах подстанции с целью обеспечения электромагнитной совместимости на энергетических объектах.

### **Введение**

Наиболее мощными источниками электромагнитных воздействий на открытых распределительных устройствах (ОРУ) электрических станций и подстанций являются короткие замыкания (КЗ) на шинах, прямой удар молнии или срабатывание ограничителей напряжения (ОПН) и разрядников. Общей особенностью указанных воздействий является стекание больших токов в заземляющее устройство (ЗУ), хотя формы импульсных токов, разумеется, существенно различаются. Однако, общая особенность этих воздействий позволяет разработать общую процедуру определения параметров электромагнитных помех в цепях релейных защит и автоматики (РЗА).

Целью данной работы является разработка процедуры определения параметров электромагнитных помех во вторичных цепях измерительных трансформаторов напряжения (ТН) подстанций (ПС) для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС).

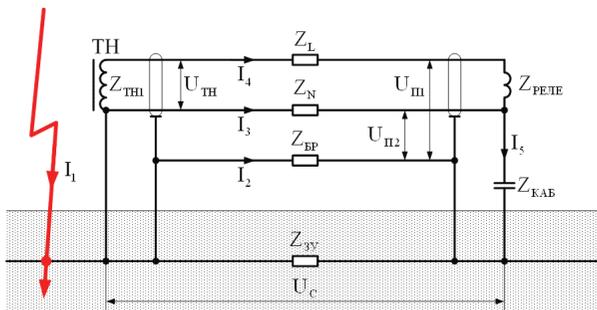
Для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) должны быть известны [1]: электромагнитная обстановка (ЭМО); механизм связи; чувствительность приемника помех. Различают следующие механизмы связи электромагнитных воздействий [2]: гальваническая связь; связь через электрическое поле; связь через магнитной поле; связь через излучение. Подобное разделение механизмов связи является весьма условным, поскольку в реальных электрических цепях два и более механизма проявляются одновременно, но для анализа процессов данное разделение механизмов связи является достаточно удобным. При КЗ на шинах ПС вторичные цепи оказываются гальванически связанными с первичными цепями.

Известно, что для выполнения цепей напряжения используют бронированные контрольные кабели. Цепи напряжения заземляются в одной точке, которая может быть расположена как вблизи устройств РЗА, так и вблизи ТН. Рабочий режим ТН близок к режиму холостого хода (ХХ), т.е. внутреннее сопротивление ТН значительно меньше сопротивления нагрузки ТН [3, 4].

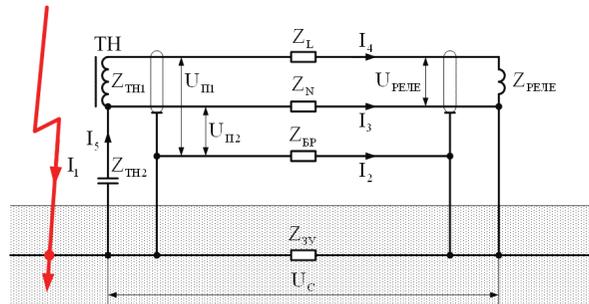
Для любого из указанных воздействий и любого варианта заземления цепей интерес представляет напряжение, прикладываемое к изоляции кабеля, а также напряжение, прикладываемое к реле напряжения.

## 1 Помехи в цепях напряжения

1.1. На рис. 1, а приведена схема, поясняющая возникновение помех в цепях напряжения при протекании больших токов по ЗУ для случая заземления цепей напряжения в клеммном ящике ТН.



а



б

Рисунок 1 – Схема, поясняющая возникновение помех в цепях напряжения при протекании больших токов по ЗУ:

а – цепи напряжения заземлены в клеммном ящике ТН;

б – цепи напряжения заземлены в релейной панели

Эквивалентное сопротивление схемы  $Z_C$  определяется по формуле:

$$Z_C = \frac{Z_{ЗУ} \cdot Z_{БР} \cdot Z_1}{Z_{ЗУ} \cdot Z_{БР} + Z_1 \cdot (Z_{ЗУ} + Z_{БР})}, \quad (1)$$

где  $Z_{3У}$  – сопротивление связи по элементам 3У между точками заземления брони кабеля;  $Z_{БР}$  – сопротивление брони кабеля;  $Z_1$  – сопротивление цепей напряжения, определяемое по формуле:

$$Z_1 = \frac{Z_N \cdot Z_2}{Z_N + Z_2} + Z_{КАБ}, \quad (2)$$

где  $Z_N$  – сопротивление нулевого провода кабеля;  $Z_{КАБ}$  – емкость на землю заземленного проводника кабеля;  $Z_2$  – сопротивление фазного участка цепей напряжения, определяемое по формуле:

$$Z_2 = Z_{ТН1} + Z_L + Z_{РЕЛЕ}, \quad (3)$$

где  $Z_{ТН1}$  – индуктивная составляющая сопротивления вторичной обмотки ТН;  $Z_L$  – сопротивление фазного провода кабеля;  $Z_{РЕЛЕ}$  – сопротивление реле (пускового органа защиты).

На высоких частотах сопротивления  $Z_{ТН1}$  и  $Z_{РЕЛЕ}$  значительно больше сопротивления  $Z_L$ , кроме того, сопротивление  $Z_{РЕЛЕ}$  значительно больше сопротивления  $Z_{ТН1}$  (поскольку ТН работает в режиме, близком к режиму ХХ), поэтому сопротивлениями  $Z_L$  и  $Z_{ТН1}$  можно пренебречь, тогда сопротивление  $Z_2$  близко к сопротивлению  $Z_{РЕЛЕ}$ . Большое сопротивление  $Z_2$  шунтировано меньшим сопротивлением  $Z_N$ , поэтому сопротивление  $Z_1$  близко к сумме сопротивлений  $Z_N$  и  $Z_{КАБ}$ , но шунтировано меньшим сопротивлением  $Z_{3У}$ , следовательно, сопротивление  $Z_C$  близко к сопротивлению  $Z_{3У}$ .

На низких частотах емкостное сопротивление  $Z_{КАБ}$  значительно больше сопротивлений  $Z_N$  и  $Z_2$ , поэтому сопротивлениями  $Z_N$  и  $Z_2$  можно пренебречь, тогда сопротивление  $Z_1$  близко к сопротивлению  $Z_{КАБ}$ , но шунтировано меньшим сопротивлением  $Z_{3У}$ , следовательно, сопротивление  $Z_C$  по-прежнему близко к сопротивлению  $Z_{3У}$ .

Ток помехи  $I_5$ , ответвляющийся с 3У в цепи напряжения:

$$I_5 = U_C / Z_1, \quad (4)$$

где  $U_C$  – напряжение на эквивалентном сопротивлении схемы  $Z_C$ , обусловленное растеканием воздействующего тока  $I_1$ .

Ток  $I_2$ , протекающий по броне кабеля:

$$I_2 = U_C / Z_{БР}. \quad (5)$$

Токи помехи в нулевом проводе  $I_3$  и в реле  $I_4$ :

$$I_3 = \frac{U_C - I_5 \cdot Z_{КАБ}}{Z_N}; \quad (6)$$

$$I_4 = \frac{U_C - I_5 \cdot Z_{КАБ}}{Z_2}. \quad (7)$$

Напряжения помехи между фазным проводом и землей  $U_{П1}$ , между нулевым проводом и землей  $U_{П2}$ , на клеммах вторичной обмотки ТН  $U_{ТН}$  и на клеммах реле  $U_{РЕЛЕ}$ :

$$U_{П1} = I_4 \cdot Z_{РЕЛЕ} + I_5 \cdot Z_{КАБ} = U_C \frac{1}{Z_2} \left[ Z_{РЕЛЕ} + \frac{Z_{КАБ}}{Z_1} (Z_2 - Z_{РЕЛЕ}) \right]; \quad (8)$$

$$U_{\Pi 2} = I_5 \cdot Z_{\text{КАБ}} = U_C \frac{Z_{\text{КАБ}}}{Z_1}; \quad (9)$$

$$U_{\text{ТН}} = I_4 \cdot Z_{\text{ТН}} = U_C \left( 1 - \frac{Z_{\text{КАБ}}}{Z_1} \right) \frac{Z_{\text{ТН}}}{Z_2}; \quad (10)$$

$$U_{\text{РЕЛЕ}} = U_{\Pi 1} - U_{\Pi 2} = U_C \left( 1 - \frac{Z_{\text{КАБ}}}{Z_1} \right) \frac{Z_{\text{РЕЛЕ}}}{Z_2}. \quad (11)$$

На высоких частотах сопротивление  $Z_1$  мало и близко к сумме сопротивлений  $Z_{\text{КАБ}}$  и  $Z_N$  ( $Z_1 \approx Z_{\text{КАБ}} + Z_N$ ), а сопротивление  $Z_2 \approx Z_{\text{РЕЛЕ}}$ , поэтому  $U_{\Pi 1} \approx U_C$ ,  $U_{\text{ТН}} \approx 0$ , а напряжения  $U_{\Pi 2}$  и  $U_{\text{РЕЛЕ}}$  зависят от соотношения сопротивлений  $Z_N$  и  $Z_{\text{КАБ}}$ :

$$U_{\Pi 2}^{\text{ВЧ}} \approx U_C \frac{Z_{\text{КАБ}}}{Z_{\text{КАБ}} + Z_N}; \quad U_{\text{РЕЛЕ}}^{\text{ВЧ}} = U_C \frac{Z_N}{Z_{\text{КАБ}} + Z_N}. \quad (12)$$

Если сопротивление  $Z_{\text{КАБ}}$  значительно больше сопротивления  $Z_N$ , то сопротивлением  $Z_N$  можно пренебречь, тогда  $U_{\Pi 2} \approx U_C$ ,  $U_{\text{РЕЛЕ}} \approx 0$ . Если сопротивление  $Z_{\text{КАБ}}$  значительно меньше сопротивления  $Z_N$ , то сопротивлением  $Z_{\text{КАБ}}$  можно пренебречь, тогда  $U_{\Pi 2} \approx 0$ ,  $U_{\text{РЕЛЕ}} \approx U_C$ .

На низких частотах емкостное сопротивление  $Z_{\text{КАБ}}$  велико и напряжение  $U_C$  приложено к этой емкости, поэтому  $U_{\Pi 1} \approx U_C$ ,  $U_{\Pi 2} \approx U_C$ ,  $U_{\text{ТН}} \approx 0$ ,  $U_{\text{РЕЛЕ}} \approx 0$ .

**1.2.** На рис. 1, б приведена схема, поясняющая возникновение помех в цепях напряжения при протекании больших токов по ЗУ для случая заземления цепей напряжения в релейной панели.

Эквивалентное сопротивление схемы  $Z_C$  определяется по формуле (1), но с учетом того, что сопротивление цепей напряжения  $Z_1$  определяется по формуле:

$$Z_1 = \frac{Z_N \cdot Z_2}{Z_N + Z_2} + Z_{\text{ТН}2}, \quad (13)$$

где  $Z_N$  – сопротивление нулевого провода кабеля;  $Z_{\text{ТН}2}$  – емкостная составляющая сопротивлений ТН;  $Z_2$  – сопротивление фазного участка цепей напряжения, определяемое по формуле (3).

На высоких частотах сопротивление  $Z_2$  близко к сопротивлению  $Z_{\text{РЕЛЕ}}$ , сопротивление  $Z_1$  близко к сумме сопротивлений  $Z_N$  и  $Z_{\text{КАБ}}$ , но шунтировано меньшим сопротивлением  $Z_{3\text{У}}$ , следовательно, сопротивление  $Z_C$  близко к сопротивлению  $Z_{3\text{У}}$ .

На низких частотах емкостное сопротивление  $Z_{\text{ТН}2}$  значительно больше сопротивлений  $Z_N$  и  $Z_2$ , поэтому сопротивлениями  $Z_N$  и  $Z_2$  можно пренебречь, тогда сопротивление  $Z_1$  близко к сопротивлению  $Z_{\text{ТН}2}$ , но шунтировано меньшим сопротивлением  $Z_{3\text{У}}$ , следовательно, сопротивление  $Z_C$  по-прежнему близко к сопротивлению  $Z_{3\text{У}}$ .

Ток помехи  $I_5$ , ответвляющийся с ЗУ в цепи напряжения, определяется по формуле (4), но с учетом формулы (13). Ток  $I_2$ , протекающий по броне кабеля,

определяется по формуле (5).

Токи помехи в нулевом проводе  $I_3$  и в реле  $I_4$ :

$$I_3 = \frac{U_C - I_5 \cdot Z_{\text{ТН2}}}{Z_N}; \quad (14)$$

$$I_4 = \frac{U_C - I_5 \cdot Z_{\text{ТН2}}}{Z_2}. \quad (15)$$

Напряжения помехи между фазным проводом и землей  $U_{\text{П1}}$ , между нулевым проводом и землей  $U_{\text{П2}}$ , на клеммах вторичной обмотки ТН  $U_{\text{ТН}}$  и на клеммах реле  $U_{\text{РЕЛЕ}}$ :

$$U_{\text{П1}} = I_4 \cdot Z_{\text{ТН1}} + I_5 \cdot Z_{\text{ТН2}} = U_C \left[ \frac{Z_{\text{ТН2}}}{Z_1} + \frac{Z_{\text{ТН1}}}{Z_2} \left( 1 - \frac{Z_{\text{ТН2}}}{Z_1} \right) \right]; \quad (16)$$

$$U_{\text{П2}} = I_5 \cdot Z_{\text{ТН2}} = U_C \frac{Z_{\text{ТН2}}}{Z_1}; \quad (17)$$

$$U_{\text{ТН}} = U_{\text{П1}} - U_{\text{П2}} = U_C \left( 1 - \frac{Z_{\text{ТН2}}}{Z_1} \right) \frac{Z_{\text{ТН1}}}{Z_2}; \quad (18)$$

$$U_{\text{РЕЛЕ}} = I_4 \cdot Z_{\text{РЕЛЕ}} = U_C \left( 1 - \frac{Z_{\text{ТН2}}}{Z_1} \right) \frac{Z_{\text{РЕЛЕ}}}{Z_2}. \quad (19)$$

На высоких частотах  $Z_2 \approx Z_{\text{РЕЛЕ}}$ ,  $Z_1 \approx Z_{\text{ТН2}} + Z_N$ , поэтому  $U_{\text{ТН}} \approx 0$ , а напряжения  $U_{\text{П1}}$ ,  $U_{\text{П2}}$  и  $U_{\text{РЕЛЕ}}$  зависят от соотношения сопротивлений  $Z_N$  и  $Z_{\text{КАБ}}$ :

$$U_{\text{П1}}^{\text{ВЧ}} \approx U_{\text{П2}}^{\text{ВЧ}} \approx U_C \frac{Z_{\text{ТН2}}}{Z_{\text{ТН2}} + Z_N}; \quad U_{\text{РЕЛЕ}}^{\text{ВЧ}} = U_C \frac{Z_N}{Z_{\text{ТН2}} + Z_N}. \quad (20)$$

Если сопротивление  $Z_{\text{ТН2}}$  значительно больше сопротивления  $Z_N$ , то сопротивлением  $Z_N$  можно пренебречь, тогда  $U_{\text{П1}} \approx U_{\text{П2}} \approx U_C$ ,  $U_{\text{РЕЛЕ}} \approx 0$ . Если сопротивление  $Z_{\text{ТН2}}$  значительно меньше сопротивления  $Z_N$ , то сопротивлением  $Z_{\text{ТН2}}$  можно пренебречь, тогда  $U_{\text{П1}} \approx U_{\text{П2}} \approx 0$ ,  $U_{\text{РЕЛЕ}} \approx U_C$ .

На низких частотах сопротивление  $Z_{\text{ТН2}}$  велико и напряжение  $U_C$  приложено к этой емкости, поэтому  $U_{\text{П1}} \approx U_C$ ,  $U_{\text{П2}} \approx U_C$ ,  $U_{\text{ТН}} \approx 0$ ,  $U_{\text{РЕЛЕ}} \approx 0$ .

### Выводы по п. 1

В табл. 1 и 2 приведены высокочастотные и низкочастотные приближения напряжений помех  $U_{\text{ТН}}$ ,  $U_{\text{П1}}$ ,  $U_{\text{П2}}$  и  $U_{\text{РЕЛЕ}}$  в случае заземления цепей напряжения в клеммном ящике ТН – табл. 1, в случае заземления цепей напряжения в релейной панели – табл. 2. Сравнительный анализ данных, приведенных в табл. 1 и 2, позволяет сделать следующие выводы.

Параметры помех в цепях напряжения, как и в токовых цепях [5], на высоких и низких частотах определяются параметрами цепей и напряжением  $U_C$ . Напряжение  $U_C$  определяется частью воздействующего тока, которая отвечает в эквивалентное сопротивление схемы  $Z_C$ . Поэтому, выполнив измерения напряжения  $U_C$  при имитации воздействующих токов в некотором мас-

штабе по амплитуде, но с сохранением формы тока, и зная параметры цепей напряжения, можно определить параметры электромагнитных помех.

Высокочастотные и низкочастотные приближения позволяют выполнить оценку параметров помех «сверху». Погрешность оценки зависит от того, на сколько эквивалентное сопротивление схемы  $Z_C$  отличается от сопротивления связи  $Z_{3y}$ : чем меньше сопротивление  $Z_C$  отличается от сопротивления  $Z_{3y}$ , тем меньше погрешность оценки параметров помех.

Таблица 1 – Помехи в цепях напряжения, заземленных в клеммном ящике ТН

Наименование параметра	Общая формула	ВЧ приближение		НЧ приближение
		$Z_{КАБ} \gg Z_N$	$Z_{КАБ} \ll Z_N$	
Ток помехи $I_2$	(5)	$I_2 \approx U_C / Z_{БР}$		$I_2 \approx U_C / Z_{БР}$
Ток помехи $I_3$	(6)	$I_3 \approx U_C / Z_{КАБ}$	$I_3 \approx U_C / Z_N$	$I_3 \approx 0$
Ток помехи $I_4$	(7)	$I_4 \approx 0$	$I_4 \approx U_C / Z_{РЕЛЕ}$	$I_4 \approx 0$
Напряжение помехи $U_{П1}$	(8)	$U_{П1} \approx U_C$		$U_{П1} \approx U_C$
Напряжение помехи $U_{П2}$	(9)	$U_{П2} \approx U_C$	$U_{П2} \approx 0$	$U_{П2} \approx U_C$
Напряжение помехи $U_{ТН}$	(10)	$U_{ТН} \approx 0$		$U_{ТН} \approx 0$
Напряжение помехи $U_{РЕЛЕ}$	(11)	$U_{РЕЛЕ} \approx 0$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$U_{РЕЛЕ} \approx 0$

Таблица 2 – Помехи в цепях напряжения, заземленных в релейной панели

Наименование параметра	Общая формула	ВЧ приближение		НЧ приближение
		$Z_{ТН2} \gg Z_N$	$Z_{ТН2} \ll Z_N$	
Ток помехи $I_2$	(5)	$I_2 \approx U_C / Z_{БР}$	$I_2 \approx U_C / Z_{БР}$	$I_2 \approx U_C / Z_{БР}$
Ток помехи $I_3$	(14)	$I_3 \approx U_C / Z_{ТН2}$	$I_3 \approx U_C / Z_N$	$I_3 \approx 0$
Ток помехи $I_4$	(15)	$I_4 \approx 0$	$I_4 \approx U_C / Z_{РЕЛЕ}$	$I_4 \approx 0$
Напряжение помехи $U_{П1}$	(16)	$U_{П1} \approx U_C$	$U_{П1} \approx 0$	$U_{П1} \approx U_C$
Напряжение помехи $U_{П2}$	(17)	$U_{П2} \approx U_C$	$U_{П2} \approx 0$	$U_{П2} \approx U_C$
Напряжение помехи $U_{ТН}$	(18)	$U_{ТН} \approx 0$		$U_{ТН} \approx 0$
Напряжение помехи $U_{РЕЛЕ}$	(19)	$U_{РЕЛЕ} \approx 0$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$U_{РЕЛЕ} \approx 0$

Сопротивление брони кабеля  $Z_{БР}$  мало на низких частотах, поэтому ток помехи  $I_2$  может оказывать термическое воздействие на изоляцию кабеля. На высоких частотах сопротивление брони кабеля  $Z_{БР}$  значительно возрастает и ток помехи  $I_2$  не оказывает существенного термического воздействия на изоляцию кабеля.

Сопротивление связи  $Z_{3y}$  значительно меньше сопротивления цепей напряжения  $Z_1$  на высоких и низких частотах. Следовательно, в эти цепи ответвляется не значительная часть воздействующего тока  $I_1$ , поэтому токи помех  $I_3$  и  $I_4$  не оказывают существенного термического воздействия на проводники и изоляцию кабеля.

На низких частотах сопротивление связи  $Z_{3y}$  мало, поэтому напряжение  $U_C$ , а значит и напряжения помех  $U_{П1}$  и  $U_{П2}$  могут достигать сотен вольт при КЗ на шинах ПС, но все же не представляют опасности для изоляции кабеля.

На высоких частотах индуктивная составляющая сопротивления ТН  $Z_{ТН1}$

значительно меньше сопротивления реле  $Z_{РЕЛЕ}$  (ТН работает в режиме, близком к режиму холостого хода), поэтому напряжение помехи на клеммах вторичной обмотки ТН  $U_{ТН}$  близко к нулю для любого варианта заземления цепей напряжения. На низких частотах напряжение  $U_C$  прикладывается к емкости ТН и кабеля, поэтому напряжения помех на клеммах вторичной обмотки ТН  $U_{ТН}$  и на клеммах реле напряжения  $U_{РЕЛЕ}$  близки к нулю для любого варианта заземления цепей напряжения.

На высоких частотах существенно возрастает индуктивная составляющая сопротивления связи  $Z_{ЗУ}$ , поэтому напряжение  $U_C$ , а значит и напряжения помех  $U_{П1}$ ,  $U_{П2}$  и  $U_{РЕЛЕ}$  (в зависимости от соотношения сопротивлений  $Z_{КАБ}$  и  $Z_N$ ,  $Z_{ТН2}$  и  $Z_N$ ) могут достигать при ударе молнии нескольких десятков киловольт, следовательно, напряжения помех представляют опасность для изоляции кабеля. Напряжения помех  $U_{П1}$  и  $U_{П2}$  представляют опасность для изоляции с той стороны кабеля, где не выполняется заземление цепей напряжения.

Если напряжение помех превысит электрическую прочность изоляции, то произойдет КЗ в кабеле. Нормы испытаний не предусматривают испытание изоляции контрольных кабелей импульсными напряжениями. Поэтому целесообразно определить параметры помех для различных вариантов повреждения изоляции кабеля.

## 2 Помехи в цепях напряжения с замкнутым на землю нулевым проводом кабеля

На рис. 2 приведены схемы, поясняющие возникновение помех в цепях напряжения с замкнутым на землю нулевым проводом при протекании больших токов по ЗУ. Это возможно, когда высокочастотное напряжение помех  $U_{П2}$  (см. п.1) между нулевым проводом и землей превысит предел электрической прочности изоляции кабеля.

Эквивалентное сопротивление схемы  $Z_C$  (для любого варианта заземления цепей напряжения) определяется по формуле:

$$Z_C = \frac{Z_{ЗУ} \cdot Z_{БР} \cdot Z_N \cdot Z_2}{Z_{ЗУ} \cdot Z_{БР} \cdot (Z_N + Z_2) + Z_N \cdot Z_2 \cdot (Z_{ЗУ} + Z_{БР})}, \quad (21)$$

где  $Z_2$  – сопротивление фазного участка цепей напряжения, определяемое по формуле (3).

Напряжение помехи  $U_{П2}$  в месте пробоя кабеля равно нулю ( $U_{П2} = 0$ ).

Ток  $I_2$ , протекающий по броне кабеля, определяется по формуле (5).

Ток помехи  $I_5$  равен нулю, поскольку  $Z_{ТН2}$  закорочено.

Токи помехи в нулевом проводе  $I_3$  и в реле  $I_4$ :

$$I_3 = \frac{U_C}{Z_N}; \quad I_4 = \frac{U_C}{Z_2} \quad (22)$$

**2.1.** Напряжения помехи между фазным проводом и землей  $U_{П1}$ , на клеммах вторичной обмотки ТН  $U_{ТН}$  и на клеммах реле  $U_{РЕЛЕ}$  для случая заземления цепей напряжения в клеммном ящике ТН:

$$U_{\text{ПН}} = U_{\text{РЕЛЕ}} = I_4 \cdot Z_{\text{РЕЛЕ}} = U_C \frac{Z_{\text{РЕЛЕ}}}{Z_{\text{РЕЛЕ}} + Z_L + Z_{\text{ТН1}}}; \quad (23)$$

$$U_{\text{ТН}} = I_4 \cdot Z_{\text{ТН1}} = U_C \frac{Z_{\text{ТН1}}}{Z_{\text{РЕЛЕ}} + Z_L + Z_{\text{ТН1}}}. \quad (24)$$

На низких частотах сопротивления  $Z_{\text{ТН1}}$  и  $Z_{\text{РЕЛЕ}}$  значительно больше сопротивления  $Z_L$ , при этом сопротивление  $Z_{\text{РЕЛЕ}}$  значительно больше сопротивления  $Z_{\text{ТН1}}$  поскольку ТН работает в режиме близком к режиму ХХ, поэтому  $U_{\text{ПН}} = U_{\text{РЕЛЕ}} \approx U_C$ ,  $U_{\text{ТН}} \approx 0$ .

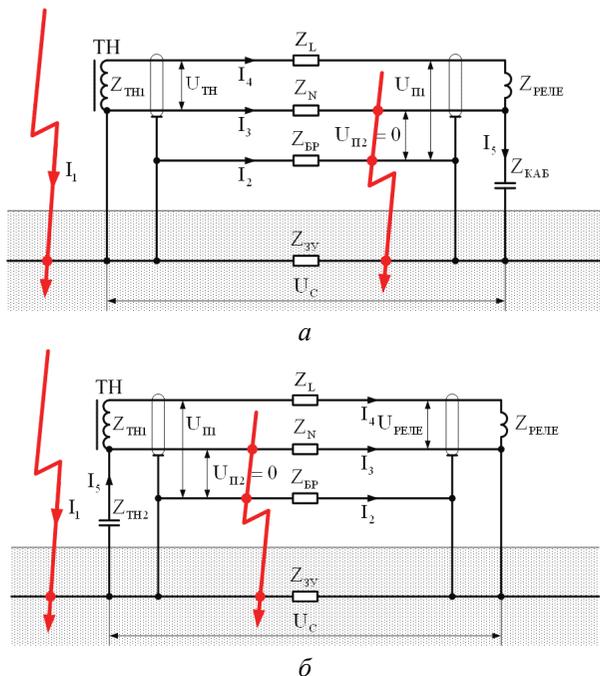


Рисунок 2 – Схемы, поясняющие возникновение помех в цепях напряжения с замкнутым на землю нулевым проводом при протекании больших токов по ЗУ: *а* – цепи напряжения заземлены в клеммном ящике ТН  
*б* – цепи напряжения заземлены в релейной панели

**2.2.** Напряжения помехи между фазным проводом и землей  $U_{\text{ПН}}$ , на клеммах вторичной обмотки ТН  $U_{\text{ТН}}$  и на клеммах реле  $U_{\text{РЕЛЕ}}$  для случая заземления цепей напряжения в релейной панели:

$$U_{\text{ПН}} = U_{\text{ТН1}} = I_4 \cdot Z_{\text{ТН1}} = U_C \frac{Z_{\text{ТН1}}}{Z_{\text{РЕЛЕ}} + Z_L + Z_{\text{ТН1}}}; \quad (25)$$

$$U_{\text{РЕЛЕ}} = I_4 \cdot Z_{\text{РЕЛЕ}} = U_C \frac{Z_{\text{РЕЛЕ}}}{Z_{\text{РЕЛЕ}} + Z_L + Z_{\text{ТН1}}} . \quad (26)$$

На низких частотах  $U_{\text{П1}} = U_{\text{ТН}} \approx 0$ ,  $U_{\text{РЕЛЕ}} \approx U_C$ .

### 3 Помехи в цепях напряжения с замкнутым на землю фазным проводом кабеля

На рис. 3 приведены схемы, поясняющие возникновение помех в цепях напряжения с замкнутым на землю фазным проводом при протекании больших токов по ЗУ. Это возможно, когда высокочастотное напряжение помех  $U_{\text{П1}}$  (см. п.1) между фазным проводом и землей превысит предел электрической прочности изоляции кабеля.

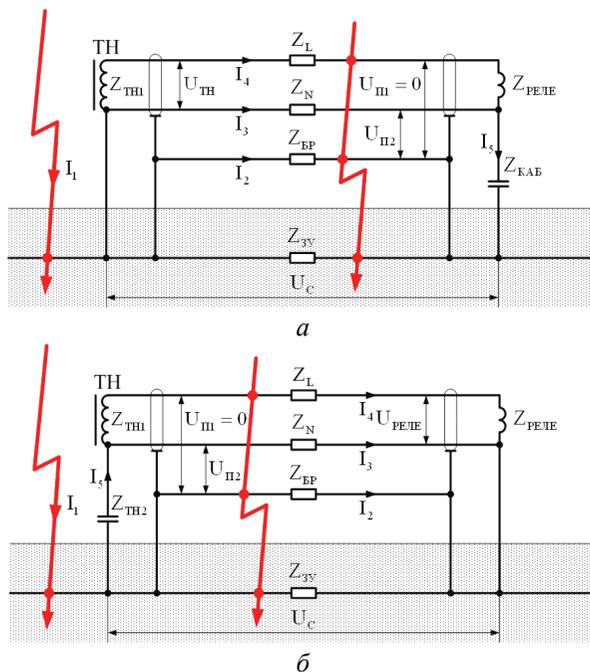


Рисунок 3 – схемы, поясняющие возникновение помех в цепях напряжения с замкнутым на землю фазным проводом при протекании больших токов по ЗУ:  
 а – цепи напряжения заземлены в клеммном ящике ТН  
 б – цепи напряжения заземлены в релейной панели

Напряжение помехи  $U_{\text{П1}}$  в месте пробоя кабеля равно нулю ( $U_{\text{П1}} = 0$ ).  
 Ток  $I_2$ , протекающий по броне кабеля, определяется по формуле (5).

**3.1. Эквивалентное сопротивление схемы  $Z_C$  для случая заземления цепей напряжения в клеммном ящике ТН:**

$$Z_C = \frac{Z_{3Y} \cdot Z_{BP} \cdot Z_1 \cdot Z_2}{Z_{3Y} \cdot Z_{BP} (Z_1 + Z_2) + Z_1 \cdot Z_2 \cdot (Z_{3Y} + Z_{BP})}. \quad (27)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – сопротивление нулевого и фазного участков цепей напряжения соответственно, определяемые по формулам:

$$Z_1 = Z_N + \frac{Z_{РЕЛЕ} \cdot Z_{КАБ}}{Z_{РЕЛЕ} + Z_{КАБ}}; \quad (28)$$

$$Z_2 = Z_L + Z_{ТН1}. \quad (29)$$

Токи помехи в нулевом  $I_3$  и фазном  $I_4$  проводах:

$$I_3 = \frac{U_C}{Z_1}; \quad I_4 = \frac{U_C}{Z_2}. \quad (30)$$

Напряжения помехи между нулевым проводом и землей  $U_{П2}$ , на клеммах вторичной обмотки ТН  $U_{ТН}$  и на клеммах реле  $U_{РЕЛЕ}$ :

$$U_{П2} = U_{РЕЛЕ} = U_C - I_3 \cdot Z_N = U_C \left( 1 - \frac{Z_N}{Z_1} \right); \quad (31)$$

$$U_{ТН} = I_4 \cdot Z_{ТН1} = U_C \frac{Z_{ТН1}}{Z_2}. \quad (32)$$

На низких частотах сопротивление  $Z_1$  близко к сопротивлению  $Z_{РЕЛЕ}$ , которое значительно больше сопротивления  $Z_N$ , поэтому  $U_{П2} = U_{РЕЛЕ} \approx U_C$ . Сопротивление  $Z_2$  близко к сопротивлению  $Z_{ТН1}$ , поэтому  $U_{ТН} \approx U_C$ .

**3.2.** Эквивалентное сопротивление схемы  $Z_C$  для случая заземления цепей напряжения в релейной панели определяется по формуле (27), сопротивление нулевого  $Z_1$  и фазного  $Z_2$  участков цепей напряжения определяются по формулам:

$$Z_1 = Z_N + \frac{Z_{ТН1} \cdot Z_{ТН2}}{Z_{ТН1} + Z_{ТН2}}; \quad (33)$$

$$Z_2 = Z_L + Z_{РЕЛЕ}. \quad (34)$$

Токи помехи в нулевом  $I_3$  и фазном  $I_4$  проводах определяются по формулам (30), но с учетом формул (33) и (34).

Напряжения помехи между нулевым проводом и землей  $U_{П2}$ , на клеммах вторичной обмотки ТН  $U_{ТН}$  и на клеммах реле  $U_{РЕЛЕ}$ :

$$U_{П2} = U_{ТН} = U_C - I_3 \cdot Z_N = U_C \left( 1 - \frac{Z_N}{Z_1} \right); \quad (35)$$

$$U_{РЕЛЕ} = I_4 \cdot Z_{РЕЛЕ} = U_C \frac{Z_{РЕЛЕ}}{Z_2}. \quad (36)$$

На низких частотах сопротивление  $Z_1$  близко к сопротивлению  $Z_{ТН1}$ , которое значительно больше сопротивления  $Z_N$ , поэтому  $U_{П2} = U_{ТН} \approx U_C$ . Сопротивление  $Z_2$  на низких частотах близко к сопротивлению  $Z_{РЕЛЕ}$ , поэтому  $U_{РЕЛЕ} \approx U_C$ .

#### 4 Помехи в цепях напряжения с замкнутыми на землю фазным и нулевым проводами кабеля

На рис. 4 приведены схемы, поясняющие возникновение помех в цепях напряжения с замкнутым на землю фазным проводом при протекании больших токов по ЗУ. Это возможно, когда высокочастотные напряжения помех  $U_{П1}$  и  $U_{П2}$  (см. п.1) превысят предел электрической прочности изоляции кабеля.

Напряжения помехи  $U_{П1}$  и  $U_{П2}$  в месте пробоя кабеля равны нулю.

Ток  $I_2$ , протекающий по броне кабеля, определяется по формуле (5).

Ток  $I_3$ , протекающий по нулевому проводу:

$$I_3 = \frac{U_C}{Z_N}. \quad (37)$$

**4.1.** Эквивалентное сопротивление схемы  $Z_C$  для случая заземления цепей напряжения в клеммном ящике ТН:

$$Z_C = \frac{Z_{ЗУ} \cdot Z_{БР} \cdot Z_2 \cdot Z_N}{Z_{ЗУ} \cdot Z_{БР} (Z_2 + Z_N) + Z_2 \cdot Z_N \cdot (Z_{ЗУ} + Z_{БР})}. \quad (38)$$

где  $Z_2$  – сопротивление фазного участка цепей напряжения:

$$Z_2 = Z_L + Z_{ТН1}. \quad (39)$$

Ток  $I_4$ , протекающий по фазному проводу:

$$I_4 = \frac{U_C}{Z_2}. \quad (40)$$

Напряжение на клеммах реле  $U_{РЕЛЕ}$  равно нулю ( $U_{РЕЛЕ} = 0$ ).

Напряжение на клеммах вторичной обмотки ТН  $U_{ТН}$ :

$$U_{ТН} = I_4 \cdot Z_{ТН1} = U_C \frac{Z_{ТН1}}{Z_L + Z_{ТН1}}. \quad (41)$$

На низких частотах сопротивление  $Z_{ТН1}$  значительно больше сопротивления  $Z_L$ , поэтому  $U_{ТН} \approx U_C$ .

**4.2.** Эквивалентное сопротивление схемы  $Z_C$  для случая заземления цепей напряжения в релейной панели определяется по формуле (38), но с учетом того, что сопротивление фазного участка цепей напряжения  $Z_2$  определяется по формуле:

$$Z_2 = Z_L + Z_{РЕЛЕ}. \quad (42)$$

Ток  $I_4$ , протекающий по фазному проводу определяется по формуле (40), но с учетом формулы (42).

Напряжение на клеммах вторичной обмотки ТН  $U_{ТН}$  равно нулю.

Напряжение на клеммах реле  $U_{РЕЛЕ}$ :

$$U_{РЕЛЕ} = I_4 \cdot Z_{РЕЛЕ} = U_C \frac{Z_{РЕЛЕ}}{Z_L + Z_{РЕЛЕ}}. \quad (43)$$

На низких частотах сопротивление  $Z_{РЕЛЕ}$  значительно больше сопротивления  $Z_L$ , поэтому  $U_{РЕЛЕ} \approx U_C$ .

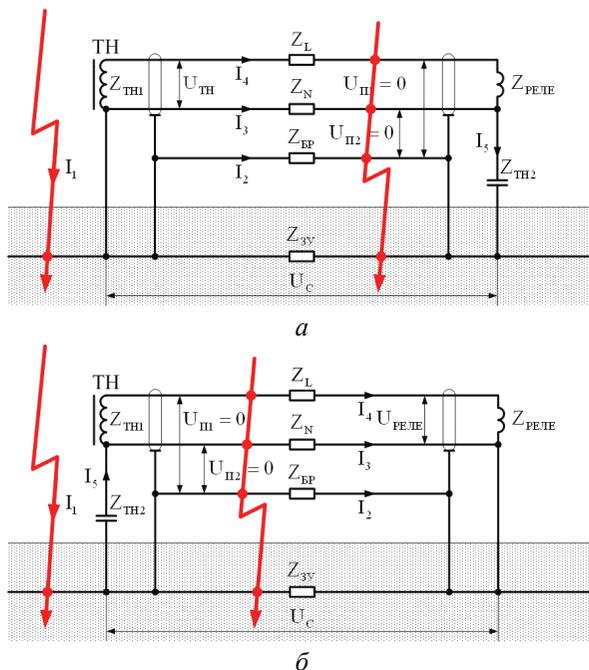


Рисунок 4 – Схемы, поясняющие возникновение помех в цепях напряжения с замкнутым на землю фазным проводом при протекании больших токов по ЗУ:  
 а – цепи напряжения заземлены в клеммном ящике ТН  
 б – цепи напряжения заземлены в релейной панели

**Выводы по пп. 2-4.** В табл. 3 приведены низкочастотные приближения напряжений и токов помех в цепях напряжения для различных вариантов замыкания в кабеле. Сравнительный анализ данных, приведенных в таблице 3, позволяет сделать следующие выводы.

При замыкании на землю только нулевого провода кабеля (см. рис. 2) независимо от места заземления цепей напряжения, напряжение помехи на клеммах реле  $U_{РЕЛЕ}$  может вызвать срабатывание реле. Ток, протекающий по нулевому проводнику  $I_3$ , может вызвать обрыв нулевого провода и/или термическое повреждение его изоляции, а ток, протекающий по фазному проводнику  $I_4$ , не может вызвать обрыв фазного провода и/или термическое повреждение его изоляции.

При замыкании на землю только фазного провода кабеля (см. рис. 3) независимо от места заземления цепей напряжения, напряжение помехи на клеммах реле  $U_{РЕЛЕ}$  может вызвать срабатывание реле. Токи, протекающие по нулевому  $I_3$  и фазному  $I_4$  проводникам не могут вызвать обрыв проводников и/или термическое повреждение их изоляции.

При замыкании на землю нулевого и фазного проводов кабеля (см. рис. 4)

независимо от места заземления цепей напряжения, ток помехи  $I_3$  может вызвать обрыв нулевого провода и/или термическое повреждение его изоляции, а ток помехи  $I_4$  не может вызвать обрыв фазного провода и/или термическое повреждение его изоляции. Напряжение помехи на клеммах реле  $U_{РЕЛЕ}$  может вызвать срабатывание реле только в случае заземления цепей напряжения в релейной панели.

Замыкание на землю нулевого и фазного проводов кабеля (см. рис. 4) подобно установке УЗИП (например, варисторов) на той стороне кабеля, где не заземляются цепи напряжения. Однако, при срабатывании таких устройств следует ограничить токи помех, протекающие по нулевому проводу, поскольку ток, протекающий по нулевому проводу, может вызвать обрыв этого провода.

Таблица 3 – Токи помех в токовых цепях с замкнутыми проводами кабеля

Схема		НЧ приближение			
		$U_{ТН}$	$U_{РЕЛЕ}$	$I_3$	$I_4$
Замкнут на землю нулевой провод	цепи заземлены в клеммном ящике ТН (см. рис. 2, а)	$U_{ТН} \approx 0$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$I_3 \approx \frac{U_C}{Z_N}$	$I_4 \approx \frac{U_C}{Z_{РЕЛЕ}}$
	цепи заземлены в релейной панели (см. рис. 2, б)	$U_{ТН} \approx 0$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$I_3 \approx \frac{U_C}{Z_N}$	$I_4 \approx \frac{U_C}{Z_{РЕЛЕ}}$
Замкнут на землю фазный провод	цепи заземлены в клеммном ящике ТН (см. рис. 3, а)	$U_{ТН} \approx U_C$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$I_3 \approx \frac{U_C}{Z_{РЕЛЕ}}$	$I_4 \approx \frac{U_C}{Z_{ТН1}}$
	цепи заземлены в релейной панели (см. рис. 3, б)	$U_{ТН} \approx U_C$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$I_3 \approx \frac{U_C}{Z_{ТН1}}$	$I_4 \approx \frac{U_C}{Z_{РЕЛЕ}}$
Замкнуты на землю два провода	цепи заземлены в клеммном ящике ТН (см. рис. 4, а)	$U_{ТН} \approx U_C$	$U_{РЕЛЕ} \approx 0$	$I_3 \approx \frac{U_C}{Z_N}$	$I_4 \approx \frac{U_C}{Z_{ТН1}}$
	цепи заземлены в релейной панели (см. рис. 4, б)	$U_{ТН} \approx 0$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$I_3 \approx \frac{U_C}{Z_N}$	$I_4 \approx \frac{U_C}{Z_{РЕЛЕ}}$

Для определения параметров электромагнитных помех в кабелях ТН при КЗ на шинах ПС необходимо при имитации КЗ на действующем объекте без вывода из работы устройств релейной защиты экспериментально измерить напряжение  $U_C$  между заземляющим проводником ТН и корпусом релейной панели, к которому подключен исследуемый кабель.

Анализ полученных выражений показывает, что чем меньше сопротивление связи  $Z_{3у}$  между заземляющим проводником ТН и корпусом релейной панели, тем меньше напряжения и токи помехи. Поэтому для уменьшения уровня помех во вторичных цепях измерительных трансформаторов напряжения следует уменьшать сопротивление связи.

**Список литературы:** 1. Шваб А.Й. Электромагнитная совместимость: пер. с нем. В.Д. Мазина и С.А. Спектора : 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. И.П. Кужекина. – М.: Энергоатомиздат, 1998. 2. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с. 3. Вавин В. Н. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи: изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. 4. С.И. Лезнов, А.Л. Фаерман. Устройство и обслуживание вторичных цепей электроустановок / Под ред. М.Д. Кучкина. – М.: Энергия, 1979. 5. Воронина З.А., Глебов О.Ю., Колушко Г.М. Определение уровня электромагнитных помех в кабелях трансформаторов тока при коротком замыкании на шинах подстанции с целью обеспечения электромагнитной совместимости // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ». – Вып. 16. – 2011. – С. 44-59.

*Поступила в редколлегию 20.03.2012.*

УДК 004.8

*М.А.ДЖЕНЮК*, магистр, НТУ «ХПИ»

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СЕГМЕНТИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ВИДЕОФАЙЛОВ**

Розглянуті питання автоматичного створення ієрархічної структури відеофайлів, проаналізовані існуючі методи роботи з відеоінформацією і визначені їхні основні алгоритми. На основі проведенного аналізу створені алгоритми і розроблена програма автоматичного створення ієрархічної структури відеофайлів.

The questions of automatic creation of an outline video files are considered, the existing methods of operation with the videoinformation are parsed and their main algorithms are defined. It was developed the algorithm based on analyses and created the program of automated creation outline video files structure.

Рассмотрены вопросы автоматического создания иерархической структуры видеофайлов, проанализированы существующие методы работы с видеoinформацией и определены их основные алгоритмы. На основе проведенного анализа создан алгоритм и разработана программа автоматического создания иерархической структуры видеофайлов.

**Анализ литературы. Постановка проблемы.** Увеличение объемов видеoinформации и цифровых сообщений привело к проблемам обработки видеoinформаций, которые связаны с извлечением содержания этой информации, определением ее характеристик и хранением полученных данных в цифровой компактной и доступной форме. Манипулирование визуальной информацией возможно лишь при осуществлении быстрого доступа к базе данных изображений, видео или документов, преобразованных в цифровую форму. Эти проблемы частично решены, но остаются всегда актуальными, вследствие разнообразия приложений и высокого разнообразия данных.

**Цель статьи** – разработка методики сегментирования потоков видеoinформации для автоматизации процесса обработки видеофайлов.

**Сегментирование потоков видеoinформации.** При работе с видеоизображением анализ содержимого визуальной информации осуществляется для выделения интересующих фрагментов информации и ее интерпретации.

Обработка видеoinформации в зависимости от решения определенных задач подразделяется на соответствующие этапы. Каждый из этих этапов характеризуется собственной задачей и методами ее решения [1,2].

Для выделения объекта на изображении или на кадре видео необходимо поместить описание объекта в память компьютера и научиться его сопоставлять с разными участками изображения. Такой подход применим, когда объект поиска известен. Однако, объектов может быть много, поэтому такая процедура окажется слишком трудоемкой. Сегментацию изображения на объекты (до их распознавания), на основе максимально общих объектных свойств (признаков) называют семантической сегментацией. Одним из важнейших свойств объектов является его способность загоразживать другие объекты.

Таким образом, задача семантической сегментации – это, прежде всего, задача обнаружения краев заслонения.

Сегментация видеодокументов подразделяется на:

- выделение объекта на видеоизображении;
- разделение по временным границам.

Выделение (распознавание) объекта на видеоизображении происходит путем сопоставления описания данного объекта с различными участками видеоизображения (в случае, если объект известен).

При сегментации видеоизображения по временным границам происходит процесс разделения видеодокумента (фильм, телевизионные новости, спортивная программа, документальный фильм, и т.д.) с определением временных границ между последовательностями изображений (элементами) подобного содержания. Переход от одного элемента к другому может быть четким, в течение нескольких кадров, или плавным – около десяти кадров (более сложный для определения).

По своей сути определение временных границ видеодокумента сходно с выделением объекта на изображении, так как происходит путем сопоставления ключевых кадров, хранящихся в графической БД, характерных для конкретного видеосегмента, с текущим кадром видео. Данный тип сегментации является более сложным, так как при сравнении различных кадров зачастую используется распознавание объектов, содержащихся в данных кадрах, которые позволяют классифицировать данный кадр и определить, к какому типу сегментов он относится.

Под распознаванием понимается возможность выделения совокупности признаков идентифицирующих объект. Любая задача распознавания сводится к самостоятельной классификации машинного изображения, без помощи человека. При этом распознавание делится на большое количество отдельных задач. В основе решения каждой задачи лежит своя технология, основанная на определенных принципах, различающихся в зависимости от вида распознавания [3-5].

Существует ряд задач, связанных с проблемой распознавания. К ним от-

носятся задачи распознавания сцен, образов, текста. Основной из них является распознавание образов. Речь идет о ситуации, в которой необходимо определить, какой объект изображен, т.е. необходимо отнести изображение к одному из известных классов.

Следующей задачей, связанной с проблемой распознавания, является распознавание сцен. При этом надо не только классифицировать объекты, но сначала выделить на изображении отдельные объекты, которые являются кандидатами на классификацию.

Обе задачи не имеют до сих пор эффективного решения, так как количество возможных объектов, не говоря уж об их сочетаниях, практически бесконечно, что крайне затрудняет возможность программной реализации и создания алгоритмов в этой области.

В целом проблема распознавания образов состоит из двух частей: обучения и распознавания. Обучение осуществляется путем показа отдельных объектов с указанием их принадлежности тому или другому образу. В результате обучения распознающая система приобретает способность реагировать одинаковыми реакциями на все объекты одного образа и различными на все объекты различных образов. Очень важно, чтобы процесс обучения завершался только путем показа конечного числа объектов без каких-либо других подсказок. В процессе обучения указываются только сами объекты и их принадлежность образу. За обучением следует процесс распознавания новых объектов, который характеризует действия уже обученной системы [5-8]. Автоматизация этих процедур и составляет проблему обучения распознаванию образов.

Автоматическое структурирование документа состоит из двух основных этапов:

- 1) сегментация – определение границ видеофрагментов и разбиение видео документа на элементы;
- 2) индексации – определение элемента и установление связей между элементами в рамках данного документа (при помощи логических правил).

Разбиение на сегменты и определение типа видеосегмента происходит путем попиксельного сравнения каждого кадра видеодокумента с предыдущим. Для ускорения работы алгоритма это сравнение производится между пикселями вертикальных (или горизонтальных) полос кадра. Таким образом, сравнивая каждую вторую (при коэффициенте частоты сравнения  $T = 50\%$ ), третью полосу (при коэффициенте  $T = 33\%$ ) скорость обработки увеличивается в 2 и 3 раза соответственно, а точность сравнения теряется незначительно. Опытным путем было выявлено оптимальное значение коэффициента  $T$  равное  $20\%$ , то есть сравнение каждой пятой линии. Таким образом, количество сравниваемых пикселей уменьшается в  $\frac{100\%}{T}$  раз.

**Математическое описание процесса разбиения на сегменты.** Обозначим высоту в пикселях  $n$ -ого кадра  $H_n$ , а ширину  $W_n$ . Тогда количество пикселей кадра будет равно  $P_n = H_n \cdot W_n$ . Пусть количество совпавших после срав-

нения пикселей равно  $x$  (в случае полного совпадения  $x = P_n$ ). Введем допустимый коэффициент совпадения  $S$ , который характеризует принадлежность сравниваемых кадров к одному определенному типу сегментов (при сегментации сегменты нумеруются, а определение и присваивание типа выполняется при индексации).

$$x \geq H_n \cdot W_n \cdot S \text{ или } x \geq P_n \cdot S.$$

Опытным путем было определено значение коэффициента совпадения  $S = 0,8$ , при котором система работает наиболее эффективно. Другими словами, при совпадении 80 % пикселей данного кадра с предыдущим считают эти кадры принадлежащими одному видеосегменту. То есть если  $S_m \geq S$ , где  $S_m$  – текущее значение коэффициента совпадения, получаемое по формуле

$$S_m = \frac{x}{P_n}.$$

В противном случае (если отношение совпавших пикселей  $x$  к общему количеству пикселей  $P_n$  меньше  $S$ ) происходит запись сегмента и его временных параметров (время начала и конца) в структуру видеодокументов.

Данный алгоритм эффективно работает при определении резких переходов между сегментами видеодокумента. В случае плавных переходов процесс сегментации происходит следующим образом: если при сравнении данного кадра с предыдущим, последующего с данным и т.д. текущее значение  $S_m$  находится в интервале между коэффициентом совпадения  $S$  и коэффициентом перехода  $S_n$  (опытным путем получено оптимальное значение  $S_n = 0,6$ ), то это означает начало плавного перехода между сегментами.

$$S \geq S_m \geq S_n.$$

При нахождении первого  $n$ -ого кадра, относящегося к какому-либо сегменту, будем считать, что  $(n-1)$ -ый кадр является концом плавного перехода.

**Выводы.** Детально разработан концептуальный подход к решению задачи автоматического создания иерархической структуры документов, для чего было определено место сегментации в общей задаче. Была разработана упрощенная схема программы и описаны ее основные модули. Создание структурной схемы решения задачи позволило разработать методику решения поставленной задачи.

**Список литературы:** 1. Хармон Л. Распознавание образов при помощи цифровых вычислительных машин / Л. Хармон / М.: Мир, 1974. 2. Харп П. Распознавание образов и анализ сцен / П. Руда, П. Харп / М.: Мир, 1970. 3. Mubarrac Shah Fundamentals of computer vision // Computer Science Department, University of Central Florida, Orlando, 1997. 4. Forsyth David A., Ponce Jean Computer Vision. A modern approach // Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458. 5. Закревский А.Д. Логика распознавания / Закревский А.Д. / Мн.: Наука и техника, 1988. – 118 с. 6. Shapiro Linda G., Stockman George C. Computer Vision // Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458. 7. Козлов В.Н. Элементы математической теории зрительного восприятия / Козлов В.Н. / М.: Изд-во Центра прикл. иссл. при мех.-мат. фак-те МГУ, 2001. – 128 с. 8. Richardson J. M. Pattern recognition and group theory // Frontiers of pattern (Watanabe S., ed.). – New York – London: Academic Press, 1972.

Поступила в редакцию 01.04.2012.

*І.С.ДОРОХІН*, аспірант, НТУ «ХПІ»;  
*О.С.АНДРЕЄВ*, магістр, НТУ «ХПІ»

## **МОДЕЛЮВАННЯ БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ У МЕРЕЖАХ MPLS**

Обґрунтована необхідність реалізації методів балансування навантаження в мережах MPLS з метою перенаправлення маршрутів і перерозподілу трафіку на резервні в разі виходу з ладу однієї або кількох ліній зв'язку. Наведені приклади, реалізовані за допомогою імітаційного моделювання в програмному середовищі Opnet Modeler, підтверджують теоретичні результати авторів.

The necessity of implementing the methods of load balancing in MPLS networks to route diversion and redistribution of traffic to a backup in case of failure of one or more lines. The examples are implemented using the simulation software in the vehicle Opnet Modeler, our results confirm the theoretical.

Обоснована необходимость реализации методов балансировки нагрузки в сетях MPLS с целью перенаправления маршрутов и перераспределение трафика на резервные в случае выхода из строя одной или нескольких линий связи. Приведенные примеры, реализованные с помощью имитационного моделирования в программном средстве Opnet Modeler, подтверждают теоретические результаты авторов.

**Постановка проблеми.** Більшість оптимізаційних задач трафік-інжинірингу є мультипараметричними за своєю природою, так само, як і в реальному житті. Бажання отримати задоволення споживача найчастіше стикається з бажанням максимально ефективно використовувати ресурси мережі. Споживач потребує все більш і більш якісного і швидкого з'єднання, в той час як адміністратори мережі воліють мати стабільну і збалансовану мережу. Для знаходження компромісу прагнуть проаналізувати відразу кілька параметрів, що дає більш глибоке і всебічне уявлення про мережу. Тому, багатопараметрична оптимізація (MOP) мереж може дати додаткові конкурентні переваги провайдеру. Багатопараметричне завдання оптимізації розглядається як змішане двійкове завдання програмування. Три суперечливих параметра приймаються до розгляду-мінімальна вартість маршрутизації, оптимальне балансування навантаження, мінімальний поділ трафіку.

З теоретичної точки зору, важливим моментом є зростаюча складність аналізу у великих системах. Оптимізаційні задачі в мережі можуть бути дуже складні (NP-важкими), і, можливо, займуть дуже великий час для знаходження оптимального рішення. Також відомо, що для NP-важких задач час рішення значно зростає при збільшенні її розміру. Враховуючи вузькі тимчасові рамки, набагато більш практично розробити специфічний алгоритм, який повинен буде знайти рішення, близьке до оптимального за набагато менший час. Такі алгоритми називаються евристичними, їх розробка дуже популярна серед наукових робіт останніх років.

Основна проблема балансування полягає у тому, щоб вибрати LSP для виконання запитів навантаження з різними класами обслуговування в поточній

мережі. Класи обслуговування включають як трафік, що має вимоги до QoS, так і best-effort traffic. Має сенс встановити ці класи обслуговування відповідно до пріоритетів. Наприклад, якщо існує три рівні пріоритету – «високий», «середній» і «низький», то для запитів голосових і відеоданих може бути встановлений пріоритет «високий», для веб-запитів і передачі даних – «середній» і «низький» відповідно. Визначення набору пріоритетів і переваг може змінюватися в різних мережах.

**Аналіз літератури.** У роботах [1, 2], що розглядають питання оптимізації трафіку, показано, що використання частково-лінійної зростаючої функції вартості дозволяє зменшити максимальний рівень використання каналу. Крім взаємозв'язку даних функцій, в роботах розглядається різниця їх впливу на продуктивність мережі. Питання, пов'язані з перерозподілом навантаження трафіку в разі виходу з ладу ліній зв'язку і продовження роботи мережі в цілому після цього, в повному обсязі не розглянуті. Використання балансування функції може вплинути на вибір LSP, який буде розподіляти навантаження в мережі в вигляді, відмінному від зменшення максимального використання каналу в мережі.

**Метою статті** є забезпечення більш задовільної роботи ТЕ всередині автономної системи мережі MPLS, яка була розроблена з урахуванням вимог QoS. Розробка імітаційної моделі дозволить перевірити можливість перенастроювання маршрутів у разі виходу з ладу однієї з ліній і, як наслідок, перекофігуруванні мережі, результатом якої стане розрахунок нових маршрутів досягнення пункту призначення трафіку. Мережі MPLS використовують парадигму пересилання міток, що дозволяє прозоро об'єднати маршрутизацію з класифікацією трафіку і призначенням пріоритетів для нього.

Багатопараметричне завдання оптимізації визначено як:

$$\text{Min } f(v) = (f_1(v), \dots, f_Q(v)) \quad (1)$$

за умови, що  $v \in X_f$ , де  $Q \geq 2$  - це число параметрів,  $v$  і  $X_f$  позначають вектор прийняття рішення і допустиму безліч відповідно. Образ  $X_f$  відповідно до векторозначної функції  $f = (f_1, \dots, f_Q)$  позначається як  $Z_f = f(X_f)$ .  $z \in Z_f$  називається параметричним вектором. Вище наведена задача з усіма параметрами в мінімізаційній формі (в рамках загальних положень). Будь-яка параметрична функція в максимізаційній формі може бути представлена як мінімізаційна форма, помножена на -1. С точки зору математичної моделі, мережа являє собою орієнтований граф, де  $V = \{1, 2, \dots, N\}$  і  $E = \{1, 2, \dots, M\}$  визначають набір маршрутизаторів і з'єднань відповідно. Орієнтоване ребро  $m$  має ємність  $u_m$  (в од./сек).

Набір всіх запитів навантаження вказаний як  $T$ . Запит навантаження  $t$  має вимогу до ширини смуги пропускання  $dt$ . Базова модель [3] включає тільки один рівень пріоритету. У разі необхідності, модель може бути розширена для випадку з кількома рівнями пріоритету. Застосування маршрутизації з комплексною ув'язкою параметрів може викликати деякі обмеження на LSP. Продук-

тивність маршрутизації QoS-трафіку дуже сильно залежить від джиттера, затримок і надійності мережі. Використання меншого числа транзитних ділянок мережі збільшує надійність передачі запитів навантаження, в той час як ймовірність збою віртуального каналу зменшується. Внаслідок цього, запити навантаження QoS-класів можуть мати обмеження за кількістю таких транзитних ділянок на їхньому шляху. Для того, щоб запровадити такі обмеження, вказується альтернативний набір шляхів  $P_i = \{p_i^1, \dots, p_i^{L_i}\}$  для кожного запиту трафіку.  $L_i$  – кількість шляхів в даному наборі. Запити навантаження нижчих класів обслуговування можуть не мати такого обмеження.

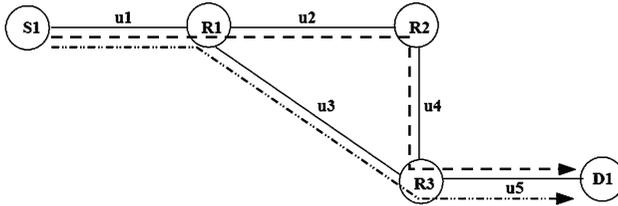


Рисунок 1 – Віртуальні шляхи можуть бути обмежені

На рис. 1 представлений приклад топології для MPLS-мережі з одним вхідним граничним маршрутизатором (S1), одним вихідним граничним маршрутизатором (D1) і трьома маршрутизаторами ядра (R1, R2, R3). Існує два запити завантаження від S1 до D1, один з них для QoS-трафіку і один – для best-effort трафіку. Два різних шляхи можливі між S1 і D1:  $p^1 = (S1, R1, R2, R3, D1)$  та  $p^2 = (S1, R1, R3, D1)$ . Суть вимоги QoS-трафіку полягає у тому, що він може бути призначений тільки тому шляху, який має не більше 4 транзитних ділянок. Тому, допустимий набір шляхів буде таким:  $P_{BE} = \{p^1, p^2\}$  – (набір шляхів для трафіку з максимальним зусиллям);  $P_{QoS} = \{p^2\}$  – (набір шляхів для трафіку QoS).

Коли запит на обслуговування не має обмеження на кількість транзитних ділянок, йому доступний альтернативний набір шляхів, який містить всі шляхи між точкою входу в мережу і точкою виходу. Однак, коли розмір мережі збільшується, кількість можливих шляхів між двома вузлами мережі зростає експоненціально.

В цьому випадку, кількість доступних шляхів повинна бути обмежена [4]. Підхід до вибору обмеження полягає у тому, щоб розглядати тільки  $k$  найкоротших шляхів для запитів на обслуговування, які не мають обмежень по кількості транзитних ділянок. Рішення даної проблеми дає  $k$  шляхів без «петель» між будь-якими двома вузлами мережі відповідно до заданої вартістю шляхів. Такий алгоритм вимагає  $O(k|V|)$  обчислень, кожне з яких має складність  $O(|V|^2)$ .

Балансування навантаження необхідне для уникнення високого завантаження окремих ліній, при тому, що інші залишаються менш завантаженими. Завантаження лінії обчислюється як відношення повного навантаження трафіком до її ємності. Для мінімізації завантаження з'єднань в мережі широко ви-

користовується параметрична функція балансування навантаження.

Будемо використовувати функцію з лінійно-ломаною характеристикою для кожного з'єднання, що базується на його рівні завантаження. Мета полягає в мінімізації суми вартості з'єднань. Ідея полягає у тому, щоб позначати відправлені пакети у разі, якщо завантаження лінії стає вище.

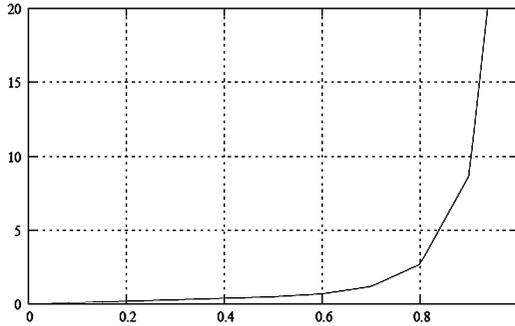


Рисунок 2 – Функція балансування навантаження з лінійно-ломаною характеристикою

У даному випадку, «помічені» пакети не допускаються і відкидаються. Функція [5] має зростаючий і опуклий характер. Її повне визначення значно залежить від мережі та вимог трафіку в ній. Вплив форми функції (конфігурації) на балансування навантаження проілюстровано на рис. 2 (ємність лінії 1 од./сек). Як видно, вартість балансування навантаження залежить від повного навантаження з'єднання  $m$ , яке позначена як  $g_m$ . Умова (3) означає, що лінія ніколи не буде перезавантажена.

$$g_m = \sum_{t \in T} \sum_{l=1}^{L_t} a_{t,l}^m x_t^l \quad \forall m \in E, \quad (2)$$

$$g_m \leq u_m \quad \forall m \in E. \quad (3)$$

Для з'єднання  $m$  з ємністю  $u_m$  завантаження дорівнює:

$$\lambda_m = \frac{g_m}{u_m}. \quad (4)$$

Точки розриву функції з'являються при наступних значеннях завантаження каналу: 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 і 0,9. Допоміжна змінна  $\phi_m$  вводиться для визначення значення функції для каналу  $m$  при заданому значенні верхніх меж. Наступні обмеження використовуються для визначення значення функції вартості балансування навантаження:

$$\phi_m \geq g_m \quad \forall m \in E; \quad (5)$$

$$\phi_m \geq 2g_m - \frac{1}{2}u_m \quad \forall m \in E; \quad (6)$$

$$\phi_m \geq 5g_m - \frac{23}{30}u_m \quad \forall m \in E; \quad (7)$$

$$\phi_m \geq 15g_m - \frac{93}{10}u_m \forall m \in E; \quad (8)$$

$$\phi_m \geq 60g_m - \frac{453}{10}u_m \forall m \in E; \quad (9)$$

$$\phi_m \geq 300g_m - \frac{2613}{10}u_m \forall m \in E; \quad (10)$$

Другий параметр мінімізує суму значень вартості:

$$\min \sum_{m \in E} \phi_m. \quad (11)$$

Приводом для цього може послужити ситуація, показана на рис. 3. У даній мережі присутні 4,0 маршрутизаторів і 5,0 односпрямованих каналів (e1, ..., e5) і два запити трафіку, один з яких потребує пропускної здатності в розмірі 10 од./с від S1 до D1, і другий, - 10 од./с від S2 до D2. Перший запит навантаження повинен бути обслужений, використовуючи канал 3, оскільки це єдиний шлях до точки призначення. Тому, максимальне значення використання мережі стає рівним 1,0.

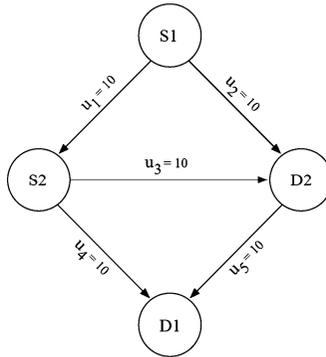


Рисунок 3 – Різниця в продуктивності між мінімальною сумою кусочно-лінійної функції вартості і мінімаксом рівня утилізації каналу в мережі

Мінімізація максимального використання каналу [7,8] як параметр не повинна зачіпати іншу частину мережі, тому передача трафіку другого запиту навантаження може бути здійснена від e1 до e2. Рішення, яке може бути знайдено шляхом мінімізації суми певних вартостей функції, надає більш збалансований розподіл трафіку між шляхами від e1 до e4, от e2 до e5. У ході рішення ми побачимо, що значення використання каналів будуть рівні 0,5. Таким чином, можна уникнути високого завантаження окремих ліній [6]. Всі значення функції балансування навантаження для різного розподілу трафіків наведені у таблиці. Такий вид проблеми «пляшкового горлечка» може більш часто виникати в мережах, де для передачі трафіку використовуються декілька альтернативних шляхів. Так як розподіл трафіку стає все більш несправедливим, приріст загальної вартості балансування навантаження також підвищується.

При балансуванні навантаження існує розбіжність у пріоритетах різних

трафіків. Більш пріоритетний трафік отримує перевагу на інтерфейсах маршрутизатора. Коли його кількість збільшується, низькопріоритетний трафік може простоювати у чергах. Тому рекомендується розподіляти QoS-трафік по мережі.

Функція балансування навантаження для різних розподілів трафіку

Завантаження по шляху 1	Завантаження по шляху 2	Вартість балансування навантаження
10,0	0,0	774
9,0	1,0	176
8,0	2,0	58
7,0	3,0	30
4,0	6,0	22
5,0	5,0	20

Для того, щоб описати кожен запит навантаження, необхідні наступні атрибути: вхідний граничний маршрутизатор; вихідний граничний маршрутизатор; очікуване значення навантаження на ширину смуги пропускання; обмеження, що накладаються на доступні шляхи, пов'язані з QoS вимогами і політиками.

В MPLS мережі балансування навантаження, як правило, налаштовується на вхідному маршрутизаторі. Конфігурації балансування навантаження розподіляють трафік серед LSP в рівній мірі завдяки хеш-алгоритмові, який вибирає наступний вузол призначення і встановлює його в таблицю переадресації для активного маршруту LSP. Кожен раз, коли змінюється next hop в будь-якому напрямку, хеш-алгоритм змінює next hop адресу. Для того, щоб показати ефективність роботи балансування навантаження в MPLS мережі, було проведено її моделювання за допомогою програмного продукту Opnet Modeler. Були створені основні і запасні MPLS тунелі за допомогою параметрів Configure Full Mesh of LSPs between nodes і Create facility protection bypass tunnels відповідно, маршрутизація OSPF була застосована до створеної мережі. Метрики інтерфейсів були задані довільним чином, після чого до всіх маршрутизаторів було застосоване балансування навантаження за допомогою параметра Load Balancing Options. У мережі були задані трафіки TriplePlay. Після цього, в Protocols-MPLS-Display LSP Routes з'явилися маршрути, трафік став розподіляється за доступними каналами зв'язку. За замовчуванням – рівномірно, якщо метрики однакові. А мережа придбала такий вигляд (рис. 4).

Також можна перенаправити трафік з певними параметрами на певні маршрути: для цього створюємо об'єкт MPLS Attribute Definition і створюємо FEC і Trunk групу, задаємо параметри для трафіків. Навантаження на маршрути змінюється, тому що є можливість примусово перенаправити трафік через інший маршрут.

При пошкодженні каналу зв'язку, трафік буде перенаправлено. Для того, щоб навантаження розподілялася пріоритетно на певний маршрут, достатньо



лізуючи при цьому балансування. Лівий малюнок показує роботу після застосування перерозподілу трафіку, а правий – до її використання.

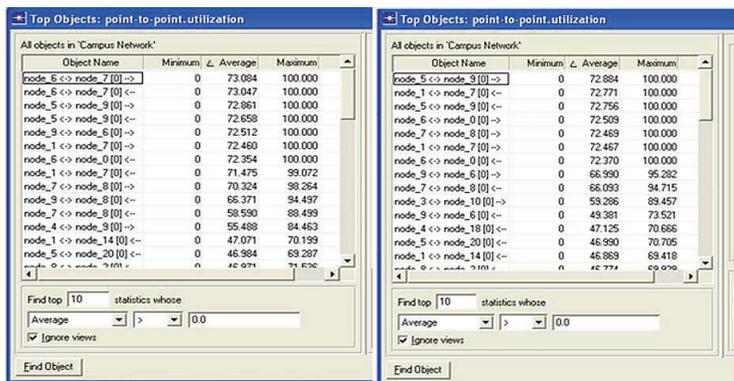


Рисунок 6 – Система перерозподілу трафіку

**Висновок.** Отримані у результаті виконання імітаційного моделювання результати підтверджують наступне: в мережах MPLS є можливість технічної реалізації методів балансування навантаження, які необхідні для перерозподілу трафіку на інші лінії зв'язку у разі обриву одного або декількох каналів зв'язку. Підсумком перенаправлення маршруту стане досягнення пакетом мережі призначення, тобто в результаті виходу з ладу обладнання або каналу зв'язку, пакет благополучно буде доставлений згідно з вимогами без помітної для кінцевого споживача затримки.

**Список літератури:** 1. *M.G.C.Resende, C.C.Ribeiro* A GRASP with path-relinking for private virtual circuit routing // Networks. – 41:104-114. – 2003. 2. *B. Fortz, M. Thorup* Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights // In Proceedings IEEE INFOCOM 2000 (2). – PP. 519-528. – Tel-Aviv, Israel, 2000. 3. *E. Gelenbe, R. Lent, Z. Xu* Design and performance of cognitive packet networks // Performance Evaluation. – 46:155-176. – 2001. 4. *S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, W. Weiss* An architecture for Differentiated Service // RFC 2475. – 1998. 5. *J. Wroclawski* The use of RSVP with IETF Integrated Services // RFC 2210. – 1997. 6. *D. O. Awduche, A. Chiu, A. Elwalid, I. Widjaja, X. Xiao* Overview and principles of internet traffic engineering // RFC 3272. – May 2002. 7. *Шапунов Ю.К.* Отечественные телекоммуникационные системы : учеб. пособие. – М.: Логос, 2005. 8. *Зайцев Д. А., Шинкарчук Т. Н.* Моделирование телекоммуникационных сетей в системе NS.

Надійшла до редколегії 16.03.2012.

*І.С.ДОРОХІН*, аспірант, НТУ «ХПІ»;  
*Р.С.КОСТЕНКО*, магістр, НТУ «ХПІ»;  
*Р.С.ШИЛО*, магістр, НТУ «ХПІ»

## **МОДЕЛЮВАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ ПОСЛУГ У СЕРЕДОВИЩІ OPNET MODELER**

Обґрунтована необхідність реалізації методів DiffServ в мультисервісних мережах з метою «розумного» управління пріоритетом трафіку для забезпечення необхідного рівня QoS. Наведені приклади, реалізовані за допомогою імітаційного моделювання в програмному середовищі Opnet Modeler, підтверджують теоретичні результати авторів.

The necessity of implementing the methods DiffServ in multiservice networks with the aim of «smart» traffic management priority to ensure the required level of QoS. The examples are implemented using the simulation environment in Opnet Modeler, confirm the theoretical results of the authors.

Обоснована необходимость реализации методов DiffServ в мультисервисных сетях с целью «умного» управления приоритетом трафика для обеспечения необходимого уровня QoS. Приведенные примеры, реализованные с помощью имитационного моделирования в среде Opnet Modeler, подтверждают теоретические результаты авторов.

**Постановка проблеми.** Забезпечення QoS представляє одну з найважливіших характеристик сучасних мультимедійних мереж. Так як технології, що підтримують QoS, до сих пір є об'єктами інтенсивного розвитку і точної настройки, моделювання та побудова моделі вкрай необхідно в даній області. В даний час технологія диференційованих послуг забезпечена рішеннями найбільш широко. Opnet Modeler – сучасне навколишнє середовище моделювання, здатне до моделювання поведінки мережевих процесів (протоколи комунікації), мережевих компонентів, додатків та їх розширених комбінацій. Воно також підтримує Diffserv з процесом конфігурації досить близьким до конфігурації реальних систем.

**Аналіз літератури.** Незважаючи на те, що є майже приведені до відповідності зі стандартом інструменти конфігурації для розгортання Diffserv в корпоративних мережах і мережах університетів [4,6,8], походження параметрів конфігурації для цих команд все ще емпіричне, і параметри досить часто отримані як результат інтенсивних експериментів. З іншого боку, такі експерименти в реальних мережах – дуже ризиковані і альтернативні рішення вітаються. А складне моделювання може бути альтернативою

**Метою статті** є моделювання розподілу трафіку по класах, для кожного з яких визначається свій рівень QoS і подальший аналіз отриманих результатів.

**DiffServ** є найбільш підходящим прикладом «розумного» управління пріоритетом трафіку. DiffServ складається з управління формуванням трафіка (класифікація пакетів, маркування, управління інтенсивністю) і керування політикою (розподіл ресурсів, політика відкидання пакетів).

Диференціювання обслуговування передбачає поділ трафіку на класи на основі вимог до якості обслуговування. Кожен клас трафіку диференціюється і обробляється мережею відповідно до заданих для цього класу механізмами QoS. Подібна схема забезпечення QoS досить часто називається схемою CoS. Слід зазначити, що диференційоване обслуговування саме по собі не передбачає забезпечення гарантій наданих послуг. Відповідно до даної схеми трафік розподіляється по класах, кожен з яких має свій власний пріоритет. З цієї причини диференційоване обслуговування досить часто називають м'яким QoS (soft QoS). Маршрутизатори, розташовані на кордоні мережі, використовують функцію класифікації для розпізнавання пакетів, що належать різним класам трафіку, залежно від значення одного або кількох полів у заголовку TCP/IP. Функція маркування пакетів використовується для розмітки класифікованого трафіку шляхом установки значення поля IP-пріоритету або поля DSCP.

Всі вузли усередині diffserv-домена визначають PNB-політику, яка повинна бути застосована до пакету на основі значення поля коду диференційованої послуги, який зберігається у ньому. Крім того, прикордонні вузли diffserv-домена виконують дуже важливу функцію формування надходженого в diffserv-домен трафіку. Формування трафіку включає в себе виконання таких функцій, як класифікація пакетів і обмеження трафіку, і зазвичай вноситься на вхідний інтерфейс надходжених в diffserv-домен пакетів. Формування відіграє вирішальну роль в управлінні надходженим в diffserv-домен трафіком, оскільки в цьому випадку для кожного пакета мережа може визначити відповідну йому PNB-політику.

PNB-політика - це спостережувана ззовні політика поведінки мережного вузла щодо пакетів з певним значенням DSCP. Всі пакети потоку трафіку зі специфічними вимогами до обслуговування несуть в собі одне і те ж значення поля DSCP. Формувачі трафіку – це різні функції якості обслуговування, які повинні бути реалізовані в прикордонних пристроях мережі. Граничні функції класифікують або маркують трафік шляхом встановлення відповідного значення поля DSCP, а також проводять моніторинг вхідного в мережу трафіку з метою перевірки його відповідності встановленому профілю. До теперішнього часу є дві стандартизовані технології обробки пакета, технологія покорокового обслуговування (PHB) для DiffServ: гарантована передача (AF) і прискорена передача (EF). Гарантована передача являє пріоритетність і контролювання обміном ресурсами між класами трафіку. Це визначає чотири класи трафіку з трьома різними пакетами пріоритетів в кожному з них. Прискорена передача - забезпечує абсолютну гарантію смуги пропускання, затримку передачі і джиттер, які необхідні сучасним мультимедійним додатків.

Application\_Config використовується для налаштування параметрів моделюваних додатків. В даному моделюванні використовувався FTP, HTTP, VoIP трафік. Система масового обслуговування, використана в імітаційній моделі, є одним з параметрів, які можна налаштувати за допомогою об'єкта QoS\_Config. У нашому прикладі система Weighted Fair Queuing (WFQ) була налаштована і призначена для трафіку. Потім, системі масового обслуговування, визначений в об'єкті QoS\_Profile, присвоюються відповідні інтерфейси основних маршру-

тів всередині області DiffServ. Крім того, потрібно налаштувати зміну трафіку та класифікації для edge маршрутизаторів. Для цієї мети звернулися до контрольних списків (ACL), які вперше визначені, щоб класифікувати надходжені потоки пакета. Списки доступу, що використовуються в нашій моделі, засновані на адресних структурах. Далі, повинні бути визначені класи трафіку. Це можна зробити конфігуруванням властивостей edge маршрутизаторів. Класи трафіку визначаються за допомогою попередньо налаштованих ACLs. Якщо умова в ACL виконується, присвоюється відповідний ID пакету. Необхідно налаштувати вимір трафіку. Це робиться так само, як конфігурація edge маршрутизаторів. Вимірювання трафіку визначає, який тип PNH використовується для даного класу трафіку. У нашому прикладі сконфігуровані як прискорена, так і гарантована доставка PNHs. На останньому етапі настроюються профілі обслуговування для даного класу трафіку. Це здійснюється за допомогою властивості об'єкта QoS Config. Під час моделювання використовуються дві черги: пріоритетні черги і Weighted Fair Queuing. Нарешті, конфігурації QoS повинні бути призначені відповідним інтерфейсам маршрутизатора.

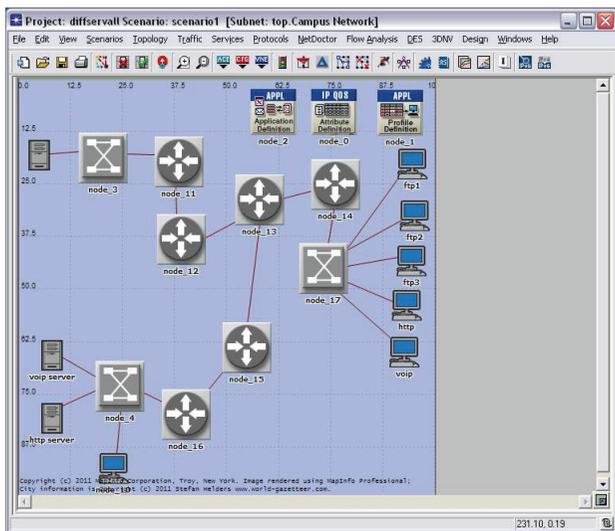


Рисунок 1 – Імітаційна модель домену DiffServ

Для порівняння створюються два сценарії: один з чутливим трафіком і застосуванням QoS конфігурації і один з чутливим і додатковим (фоновим) трафіком. Це дозволяє нам аналізувати вплив непріоритетного фонового трафіку на обробку чутливого трафіку. Диференційоване обслуговування зручно застосовувати в мережах з інтенсивним трафіком додатків. У цьому випадку важливо забезпечити відділення адміністративного трафіку мережі від всього іншого трафіку і призначити йому пріоритет, що дозволяє в будь-який момент часу бути впевненим в зв'язності вузлів мережі. Рівень втрати пакетів (packet

loss) визначає кількість пакетів, що відкидаються мережею під час передачі. У нашому випадку видно, що пріоритетний трафік передається без втрат, у той час як фоновий трафік відкидається.

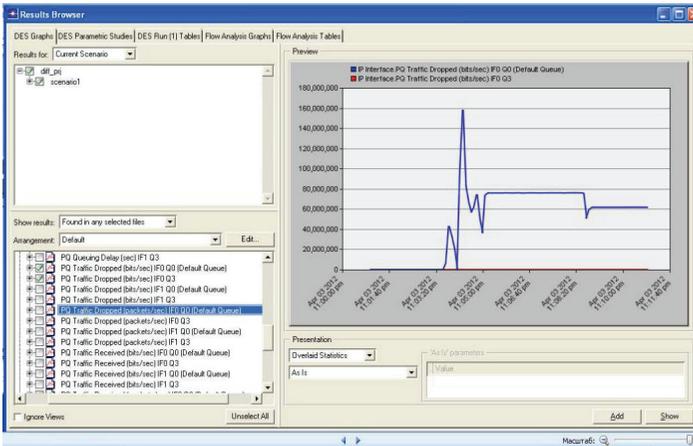


Рисунок 2 – Рівень втрати пакетів

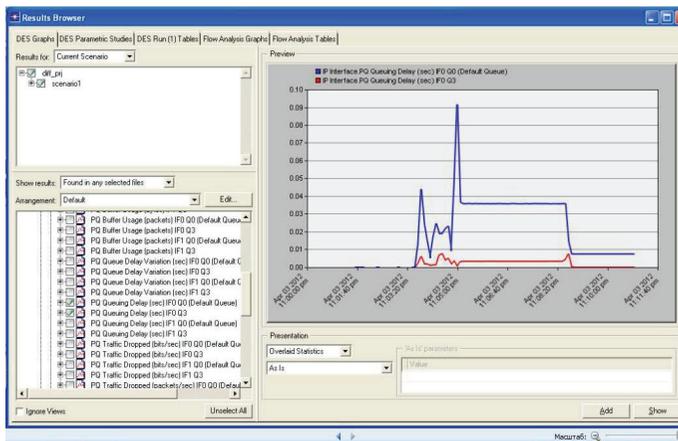


Рисунок 3 – Затримки під час передачі

Також в Ornet Modeler є можливість переглянути затримки під час передачі через мережу. Використавши цю можливість, бачимо на рис. 3, що затримки під час передачі через мережу різні для пакетів, що належать різним класам трафіку. Більш пріоритетний трафік передається з найменшими затримками, а менш пріоритетний ставиться в чергу на той час, коли передається більш пріоритетний трафік.

**Висновки.** Проаналізувавши розрахунки, отримані під час моделювання

диференціальних послуг в середовищі Opnet Modeler, можемо зробити висновки, що архітектура диференційованих послуг забезпечує базову основу, яка може бути використана постачальниками послуг для надання своїм клієнтам великого діапазону різних пропозицій в залежності від пропонованих вимог до якості обслуговування. Клієнт може вибрати необхідний рівень послуг шляхом встановлення відповідного значення поля коду диференційованої послуги DSCP для кожного окремого пакету. Слід зазначити, що архітектура диференційованих послуг визначає лише базові механізми, на основі яких здійснюється обслуговування пакетів. Використовуючи ці механізми, можемо розробити цілу безліч різних послуг.

**Список літератури:** 1. *Blake S., Black D.* An Architecture for Differentiated Services // RFC 2475. 2. *Heinane J., Baker F.* Assured Forwarding PHB Group // RFC 2597. 3. *Davie B., Charny A.* An Expedited Forwarding PHB (Per-Hop Behavior) // RFC 3246. 4. *Wang Z.* Ineternet QoS – Architectures and Mechanisms for Quality of Service. – 2001. 5. *Шарунов Ю.К.* Отечественные телекоммуникационные системы : учеб. пособие. М.: Логос, 2005. 6. *J. Wroclawski* The use of RSVP with IETF Integrated Services // RFC 2210, 1997. 7. *Kun I. Park* QoS In Packet Networks // ISBN: 0-387-23389-X. – Boston, 2005. 8. *Бакланов И. Г.* NGN: Принципы построения и реализации. – М: Эко-Трендз, 2008. 9. *D. Awduche, A. Chiu, A. Elwalid, I. Widjaja, X. Xiao* Overview and Principles of Internet Traffic Engineering // Internet informational RFC 3272. – May 2002.

*Надійшла до редколегії 09.03.2012.*

УДК 622.276.6:537.528

**В.Г.ЖЕКУЛ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев;

**В.А.КУЧЕРНЮК**, канд. техн. наук, нач. групп., НИПИ ПАО «Укрнафта», Киев;

**Ю.И.МЕЛЬХЕР**, мл. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев;

**С.Г.ПОКЛОНОВ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев;

**А.П.СМИРНОВ**, канд. техн. наук, науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев;

**И.С.ШВЕЦ**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев

## **ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНАЯ ОБРАБОТКА СКВАЖИН НА НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УКРАИНЫ**

У роботі представлено результати натурних випробувань електророзрядного способу декольматизації на нафтовидобувних свердловинах України із застосуванням закритої електродної системи. Вони показують, що дебіт свердловин після обробки виріс в 2-4 рази й залишався на цьому рівні більше 1 року. Це свідчить про ефективність і доцільність використання схеми обробки із застосуванням закритої електродної системи.

The paper features the results of full-scale tests of the electrodischarge method of decolmatation on oil-producing wells of Ukraine with use of a closed electrode system. The results herefrom demonstrate that the debit of wells after treatment has increased 2-4 times and held the same level for over 1 year. This fact indicates the efficiency and expediency of use of the treatment pattern with a closed electrode system.

В работе представлены результаты натуральных испытаний электроразрядного способа декольматации на нефтедобывающих скважинах Украины с применением закрытой электродной системы. Они показывают, что дебит скважин после обработки вырос в 2-4 раза и остался на прежнем уровне в течение более 1 года. Это свидетельствует об эффективности и целесообразности использования схемы обработки с применением закрытой электродной системы.

## **Введение**

В процессе многолетней эксплуатации производительность большинства действующих нефтяных скважин уменьшается. При этом степень выработки пласта, даже при самых благоприятных условиях, не превышает 50-60 % геологических запасов, а на месторождениях с низкопроницаемыми коллекторами, содержащих высоковязкие нефти, эта цифра колеблется от 2 до 10 %. Поддержание объемов добычи нефти на прежнем уровне можно обеспечить наращиванием объема буровых работ и введением в эксплуатацию новых скважин или внедрением эффективных технологий восстановления работоспособности старых скважин. При этом следует учесть, что затраты на увеличение производительности уже существующих скважин, как правило, намного меньше затрат на бурение новых скважин.

## **Анализ состояния**

Одна из главных причин снижения продуктивности скважины и работающей мощности интервала перфорации является уменьшение проницаемости призабойной зоны (ПЗ) вследствие ее кольматации. В обобщенном виде кольматацию можно представить как результат:

- проникновения фильтратов глинистого и цементного растворов в пласт в процессе бурения и проведения тампонажных работ;
- образования плотных трубок в результате спекания горной породы при перфорации продуктивного интервала;
- асфальто-смоло-парафиновых отложений в перфорационных отверстиях и других различного рода отложений частиц породы, выпадения продуктов реакции в результате широко применяемых обработок ПЗ химическими реагентами;
- кольматации капиллярной системы продуктивного пласта вследствие закупорки поровых каналов коллоидно-дисперсной системой, образующей пространственную сетку.

Для восстановления проницаемости призабойной зоны и очистки перфорационных отверстий от отложений и, как результат, интенсификации добычи углеводородов применяются различные методы декольматации. Среди множества этих методов одним из наиболее перспективных является электроразрядный способ [1]. Он отличается от других экологической чистотой и безопасностью проведения работ, относительной дешевизной и технологической простотой, достаточно высокой эффективностью обработки (дебит увеличивается

в 2-3 и более раза) и возможностью селективного воздействия, а также достаточно длительным сроком сохранения эффекта воздействия (от нескольких месяцев до 1 года и более).

Однако широкий диапазон изменения внутрискважинных условий: гидростатическое давление до 50 МПа, температура до 100 °С, различные по составу и электропроводности, которая может меняться в процессе обработки, скважинные жидкости (от электролитов до водонефтяных эмульсий и чистых нефтей), - оказывают существенное влияние на эффективное осуществление и реализацию электроразрядной обработки скважин. Все это приводит к тому, что на практике при условии применения открытых электродных систем (ОЭС) для стабилизации работы электроразрядного устройства устанавливают небольшие, порядка 10 мм, неоптимальные разрядные (межэлектродные) промежутки (МЭП). Это приводит к снижению эффективности разряда как по амплитуде волны давления, так и по удельному импульсу [2]. Кроме того, при малых значениях длины межэлектродного промежутка реализуется колебательный режим разряда. В результате этого наблюдается значительный эрозийный износ острейшего электрода-анода и существенно снижается ресурс импульсных конденсаторов. Второй минус схемы обработки с использованием ОЭС обусловлен тем, что в случае заполнения скважины водонефтяной эмульсией при гидростатическом давлении более 30 МПа около 30 % разрядов не завершаются пробоем и происходит ухудшение условий пробоя с повышением температуры, а при температуре в скважине более 70 °С предпробивные потери увеличиваются до 50 % от запасенной энергии [3]. При заполнении скважины водонефтяной эмульсией также всегда нужно учитывать вопрос ее устойчивости. Ее расслоение в зоне разряда может привести к существенному снижению эффективности (если в зоне разряда окажется соленая вода) или выходу из строя оборудования (если в разряде окажется чистая нефть) [4].

Поэтому для преодоления этой проблемы была разработана электродная система закрытого типа (ЗЭС) [5]. Главное отличие ЗЭС от ОЭС – наличие гидродинамически непроницаемого акустически прозрачного экрана (оболочки), отделяющего жидкость в зоне разряда от скважинной жидкости и не допускающей их смешения. Электропроводность жидкости в зоне разряда подбирается, исходя из внутрискважинных условий (температура, давление) согласно [6]. Однако широкомасштабному применению схемы обработки с ЗЭС препятствует отсутствие опыта практического использования на скважинах.

В этой связи испытание схемных решений электроразрядного оборудования с применением ЗЭС, обеспечивающих его надежную и эффективную работу в натуральных условиях при заполнении скважин любой жидкостью глушения, оценка и анализ результатов промысловых испытаний является целью настоящей работы.

### **Выбор параметров электроразрядной обработки скважин**

Использование схемных решений электроразрядной обработки с применением ЗЭС позволяет обеспечить ряд эффективных параметров электроразрядной обработки, которые были получены в результате проведения ряда тео-

ретических и экспериментальных исследований.

Теоретические исследования режимов подготовки скважины к обработке (влияние вида жидкости «глушения» скважины на эффективность воздействия) показали, что при электроразрядном воздействии в скважине, заполненной рабочим агентом с динамической вязкостью  $\sim 0,9 \cdot 10^{-2}$  Па·с (что соответствует характеристикам маловязкой нефти), на контактной границе раздела «скважинная жидкость – вязкое отложение» возникают касательные напряжения, соизмеримые с критическим напряжением сдвига для вязких веществ, чего не наблюдается в случае заполнения скважины водой. Это приводит к деформации и разрушению верхнего слоя отложений при движении скважинной жидкости. Поэтому для «глушения» скважины лучше применять более вязкие, чем вода, жидкости (нефть, водонефтяная эмульсия и т. п.) [7]. Однако этот режим подготовки возможен при использовании схемы обработки с ЗЭС. Этот вывод в дальнейшем был проверен в натурных испытаниях.

Экспериментальные исследования влияния режимов электроразрядного способа декольматации на эффективность очистки призабойной зоны скважины от хрупких отложений были выполнены на физической модели призабойной зоны скважины [8]. Результаты эксперимента показали, что наилучший эффект наблюдается на режиме с оптимальным МЭП по амплитуде волны давления. Режимы с малыми межэлектродными промежутками характеризуются сильным падением эффективности воздействия (при МЭП 10 мм эффективность воздействия снизилась на 32 %, а на МЭП, равном 5 мм, не было замечено никаких результатов воздействия). Это позволяет рекомендовать проводить электроразрядную обработку на режиме с оптимальным МЭП по амплитуде волны давления. Данный режим в специфических скважинных условиях может обеспечить только схема электроразрядной обработки с использованием ЗЭС.

### **Промысловые испытания**

В первой половине 2010 г. прошли испытания схемных решений электроразрядного оборудования с применением ЗЭС, обеспечивающих его надежную и эффективную работу в натурных условиях при заполнении скважин несколькими жидкостями глушения.

16-18 января 2010 г. были выполнены натурные испытания электроразрядного способа на двух нефтедобывающих скважинах НГДУ «Надвирнанефтегаз»: скважине № 90 Довбушанско-Быстрицкого месторождения и скважине № 58 Луквинского месторождения. С 31 мая 2010 г. по 3 июня 2010 г. были обработаны еще две нефтедобывающие скважины НГДУ «Надвирнанефтегаз»: скважина № 9 Довбушанско-Быстрицкого месторождения и скважина № 8 Пнивского месторождения.

Параметры скважин, дебит скважин до обработки и дебит скважин после обработки представлены в табл. 1.

В качестве показателя эффективности обработки скважины, устойчивости и продолжительности эффекта был выбран дебит скважин. Предварительно был замерен дебит скважин до обработки. После обработки, по прошествии 10

дней, был выполнен повторный замер дебита. Результаты испытаний и последующих проведенных замеров показали, что после электроразрядной обработки дебит по нефти всех скважин вырос: дебит скважины № 90 вырос в 2,7 раза; дебит скважины № 58 – в 4,2 раза; дебит скважины № 9 – в 2,4 раза; дебит № 8 – в 3,15 раза.

Таблица 1 – Параметры скважин, дебит скважин до и после обработки

Скважина, месторождение	Пласт. давлен., МПа	Пласт. темпер., °С	Дебит до обработки, т/сутки		Дебит после обработки, т/сутки	
			жидк.	нефть	жидк.	нефть
скважина № 58, Луквинское месторождение	10,1	34	0,287	0,24	1,19	1,0
скважина № 90, Довбушанско-Быстрицкое месторождение	11,3	58	0,619	0,46	1,72	1,24
скважина № 9, Довбушанско-Быстрицкое месторождение	21,9	59	0,593	0,5	1,597	1,2
скважина № 8, Пнивское месторождение	20,4	56	0,456	0,34	1,578	1,07

В ходе натуральных испытаний на двух скважинах проводились исследования влияния параметров подготовки скважины к обработке (тип рабочей жидкости (жидкости «глушения», заполняющей скважину)) на эффективность обработки (табл. 2). Особенностью выбранных скважин явилось высокое процентное содержание парафина. Для этого скважина № 90 глушилась пластовой жидкостью, а скважина № 58 – более вязкой жидкостью – нефтью. На скважине № 58 с повышенным содержанием парафина (11,1 %) был получен больший эффект от электроразрядной обработки, чем на скважине № 90 (процентное содержание парафина – 7,7 %). Эти результаты косвенно подтверждают вывод, полученный в работе [7] о предпочтительности заполнения скважины более вязкой, чем вода, жидкостью (например, нефть, водонефтяная эмульсия и т.п.).

Ежемесячные замеры дебита по нефти на скважинах № 58 и № 90 позволили судить об устойчивости и продолжительности эффекта обработки. Результаты замеров показали, что электроразрядная обработка характеризуется хорошей устойчивостью и продолжительностью сохранения эффекта. Для примера в табл. 3 приведены данные по динамике изменения дебита по нефти нефтяных скважин № 90 Довбушанско-Быстрицкого месторождения и № 58 Луквинского месторождения. Аналогичные результаты получены и по двум другим скважинам. Опыт эксплуатации обработанных электроразрядным спо-

собом скважин показал практически стабильную их продуктивность в течение времени более 1 года.

Таблица 2 – Параметры подготовки скважины к обработке

Скважина	Начальный дебит, (т/сутки) нефти дебит после обработки, (т/сутки)	Процентное содержание парафина жидкость глушения скважины
№ 90 Довбушанско-Быстрицкого месторождения	0,46 1,24 увеличение в ~ 2,7 раза	7,7 % пластовая вода ( $\mu=0,5 \cdot 10^{-2}$ Па·с)
№ 58 Луквинского месторождения	0,24 1,0 увеличение в ~ 4,2 раза	11,1 % товарная нефть ( $\mu=1 \cdot 10^{-2}$ Па·с)

Таблица 3 – Динамика изменения дебита по нефти нефтяных скважин

Скважина	дебит после обработки, т/сутки			
	1 мес.	2 мес.	3 мес.	4 мес.
Скважина № 58	1,00	1,00	1,00	0,97
Скважина № 90	1,18	1,14	1,10	1,18

## Выводы

Натурные испытания электроразрядного способа интенсификации добычи углеводородов на нефтедобывающих скважинах месторождений Украины показали эффективность и целесообразность использования технологической схемы обработки с применением электродной системы закрытого типа. Реализация такого схемного решения позволила увеличить дебит обработанных нефтедобывающих скважин в 2-4 раза при условии сохранения эффективности более 1 года.

**Список литературы:** 1. *Максутов Р.А.* Использование электроразрядного воздействия на призабойную зону / *Р.А.Максутов, О.Н.Сизоненко, П.П. Малошеевский* // Нефтяное хозяйство. – 1985. – № 1. – С. 34-35. 2. Экспериментальное исследование эффективности электродных систем электрогидроимпульсных скважинных устройств / *Н.И. Ковязин, С.А. Уросов, Д.А. Шишков* и др. // Известия Вузов: Нефть и газ. – 2001. – № 2. – С. 32-35. 3. Формирование электрического разряда в водо-нефтяных эмульсиях при высоких давлениях и температурах / *В.Г. Жекул, С.Г. Поклонов, Л.П. Трофимова* и др. // Электронная обработка материалов. – 2001. – № 1. – С. 37-42. 4. *Жекул В.Г.* Оптимизация электрического разряда в скважинных жидкостях применительно к обработке нефтяных скважин / *В.Г. Жекул, С.Г. Поклонов, Л.П. Трофимова* // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 6. – С. 75 - 80. 5. *Жекул В.Г.* Электроразрядные погружные установки со стабилизированными рабочими параметрами / *В.Г.Жекул, С.Г.Поклонов, И.С.Швец* // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 2. – С. 89-91. 6. Стабилизация режимных параметров высоковольтных систем электрогидроимпульсной обработки жидких неоднородных сред / *А.А. Щерба, В.М. Косенков, В.Г. Жекул* и др. // Техническая электродинамика. – 2004. – № 3. – С. 23-26. 7. The Study of the Effect of the Electrodischarge Action Modes on Viscous Deposits in Cylindrical Channels / *A.P. Smirnov, V.M.Kosenkov, V.G. Zhekul* и др. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2010. – Vol. 46, No. 3. – PP. 237-242. 8. *Жекул В.Г.* Экспериментальные исследования эффективности электроразрядного воздействия на физической модели призабойной зоны продуктивного пласта / *В.Г. Жекул, С.Г. Поклонов, А.П. Смирнов* // Электронная обработка материалов. – 2011. – № 1. – С. 101-105.

Поступила в редакцию 01.04.2012.

**В.М.ЗОЛОТАРЕВ**, д-р техн. наук, ген. директор, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;

**В.П.КАРПУШЕНКО**, канд. экон. наук, советник ген. директора, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;

**В.В.ЗОЛОТАРЕВ**, канд. техн. наук, нач. отдела, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;

**Ю.А.АНТОНЕЦ**, канд. техн. наук, техн. директор, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;

**А.А.НАУМЕНКО**, канд. техн. наук, ведущий специалист, ПАО «Завод Южкабель», Харьков

## **ЗАВИСИМОСТЬ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ОТ КОНСТРУКЦИИ МНОГОСЛОЙНОЙ СШИТОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ И ПРОВОДОВ**

На основі математичної моделі стаціонарного електричного поля в багат шаровому неідеальному діелектрику досліджено залежність тангенса кута діелектричних втрат від конструкції багат шарової зшитої (вулканізованої) ізоляції в силових кабелях і проводах.

On the basis of mathematical model of stationary electric field in multilayer non-ideal dielectric, the tangent of dielectric loss angle in multilayer crosslinked (vulcanized) structures of power cables and wires are investigated.

На основе математической модели стационарного электрического поля в многослойном неидеальном диэлектрике исследована зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от конструкции многослойной сшитой (вулканизированной) изоляции в силовых кабелях и проводах.

**Анализ источников.** Изоляционная конструкция токопроводящей жилы с пластмассовой изоляцией может быть выполнена однослойной или многослойной, в зависимости от условий ее применения. Однослойная изоляция из сшиваемых композиций может быть выполнена на основе, например, полиолефинов и органосиланов [1, 2]. Двухслойная изоляция может применяться в различного рода огнестойких кабелях [3, 4]. Причем, первый слой (считая от проводника жилы) изготавливают обычно методом обмотки из слюдяной бумаги, а второй слой – из линейного или сшитого полиэтилена (например, силанольносшитого, сшитого пероксидными соединениями в среде водяного пара или сухого сжатого азота), а также из поливинилхлоридного пластика. Трехслойная изоляция, характерная для экранированных токопроводящих жил силовых кабелей энергетического назначения напряжением 6 кВ и выше, которые под медным экраном имеют экран по жиле из проводящего полиэтилена, собственно полиэтиленовый изоляционный слой и экран по изоляции из того же проводящего полиэтилена [5, 6]. Причем все три слоя наносятся одновременно методом экструзии и одновременно вулканизируются в вулканизационной линии.

Наконец, четырехслойная изоляция может иметь место, когда на упомянутую трехслойную конструкцию методом обмотки наносят слой полупроводящего водонабухающего или не водонабухающего полотна [5, 6]. Сюда же следует отнести и случай изоляции высоковольтных защищенных проводов, которые могут иметь трехслойную пластмассовую конструкцию в виде экрана по жиле, собственно полиэтиленового изоляционного слоя и экрана по изоляции, а также четвертый изоляционный слой, которым является окружающий воздух при воздушной прокладке таких проводов [7].

**Постановка задачи.** Будем считать, что диэлектрик состоит из  $n$  кусочно-однородных областей  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_i, \dots, \Omega_n$  ограниченных, соответственно, коаксиальными цилиндрами, имеющими радиусы  $r_0 - r_1, r_1 - r_2, \dots, r_{i-1} - r_i, \dots, r_{n-1} - r_n$ . Пусть в каждой области  $\Omega_i$  однородный диэлектрик характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_i$  и удельной электропроводностью  $\gamma_i$ , а идеально проводящие электроды для возбуждения поля в диэлектрике имеют радиусы  $r_0$  и  $r_n$ . Тангенс угла диэлектрических потерь для случая однослойной изоляции вычисляется по простой формуле

$$\dot{I} = \oint J(r_n) dl = \oint \dot{Y}_n \dot{E}_n dl_n = 2\pi r_n \dot{Y}_n \dot{E}(r_n), \quad (1)$$

где  $\dot{E}(r_n)$ ,  $J(r_n)$  – соответственно, нормальная компонента электрической напряженности на внутренней поверхности внешнего электрода, имеющего радиус  $r_n$ ;  $dl$  – элемент длины линии, образующейся при сечении внешнего бесконечно тонкого электрода плоскостью, перпендикулярной оси выбранной цилиндрической системы координат;  $\dot{Y}_n$  – полная проводимость слоя диэлектрика с номером  $n$ .

Для двухслойной изоляции он вычисляется по общей формуле [8].

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{(\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2)(\gamma_1 \alpha_2 + \gamma_2 \alpha_1) + \omega^2 (\varepsilon_2 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_2)(\varepsilon_1 \alpha_2 + \varepsilon_2 \alpha_1)}{\omega [(\varepsilon_2 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_2)(\gamma_1 \alpha_2 + \gamma_2 \alpha_1) - (\varepsilon_1 \alpha_2 + \varepsilon_2 \alpha_1)(\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2)]} = \\ &= \frac{\omega^2 (\varepsilon_2^2 \gamma_1 \alpha_1 + \varepsilon_1^2 \gamma_2 \alpha_2) + \gamma_1 \gamma_2 (\gamma_1 \alpha_2 + \gamma_2 \alpha_1)}{\omega [\varepsilon_2 \gamma_1^2 \alpha_2 + \varepsilon_1 \gamma_2^2 \alpha_1 + \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2 (\varepsilon_1 \alpha_2 + \varepsilon_2 \alpha_1)]}. \end{aligned} \quad (2)$$

Выражение (2) для  $\operatorname{tg} \delta$  записано через удельные характеристики  $\varepsilon_1, \gamma_1$  и  $\varepsilon_2, \gamma_2$  слоев диэлектрика.

Рассмотрим зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от параметров трехслойных и четырехслойных изоляционных конструкций, которые имеют широкое практическое применение.

Для трехслойной изоляционной конструкции точная зависимость для  $\operatorname{tg} \delta$  было выведено в [8]

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{[(\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2) \cdot \gamma_3 - \omega^2 (\varepsilon_2 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_2) \varepsilon_3] \cdot}{[(\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2) \cdot \gamma_3 - \omega^2 (\varepsilon_2 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_2) \varepsilon_3] \cdot} \times \\ &\times \frac{[(\gamma_2 \gamma_3 - \omega^2 \varepsilon_2 \varepsilon_3) \alpha_1 + (\gamma_1 \gamma_3 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_3) \alpha_2 + (\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2) \alpha_3] +}{\cdot (-\omega) [(\varepsilon_3 \gamma_2 + \varepsilon_2 \gamma_3) \alpha_1 + (\varepsilon_3 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_3) \alpha_2 + (\varepsilon_2 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_2) \alpha_3] +} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \frac{+\omega^2[\gamma_3(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2) + \varepsilon_3(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)] \cdot}{+\omega[\gamma_3(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2) + \varepsilon_3(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)]} \cdot \\ & \times \frac{\cdot[(\varepsilon_3\gamma_2 + \varepsilon_2\gamma_3)\alpha_1 + (\varepsilon_3\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_3)\alpha_2 + (\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\alpha_3]}{\cdot[(\gamma_2\gamma_1 - \omega^2\varepsilon_2\varepsilon_3)\alpha_1 + (\gamma_1\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_3)\alpha_2 + (\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\alpha_3]} \cdot \end{aligned} \quad (3)$$

Это выражение в общем виде содержит все необходимые параметры трех изоляционных слоев, но из-за сложности его трудно анализировать.

**Решение задачи.** Чтобы проанализировать эту зависимость будем исходить из тех условий, что в проводящих экранях по жиле и изоляции (слой 1 и 3) токами смещения по сравнению с токами проводимости можно пренебречь также как можно пренебречь током проводимости по сравнению с током смещения в среднем изоляционном слое полиэтилена (слой 2). Тогда в соответствии с результатами, полученными в [8] имеем

$$\dot{Y} = \frac{\prod_{k=1}^n \dot{Y}_k}{\dot{\beta}}, \quad (4)$$

где  $\dot{\beta} = \prod_{m=1}^n \dot{Y}_m \sum_{k=1}^n \dot{Y}_k^{-1} \alpha_k$ ,  $\alpha_k = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_k}{r_{k-1}}$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ ,  $m = 1, 2, \dots, n$ .

Для трехслойной изоляции

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= \prod_{k=1}^3 \dot{Y}_k \sum_{k=1}^3 \dot{Y}_k^{-1} \alpha_k = \dot{Y}_1 \dot{Y}_2 \dot{Y}_3 \left( \frac{1}{\dot{Y}_1} \alpha_1 + \frac{1}{\dot{Y}_2} \alpha_2 + \frac{1}{\dot{Y}_3} \alpha_3 \right) = \\ &= \dot{Y}_2 \dot{Y}_3 \alpha_1 + \dot{Y}_1 \dot{Y}_3 \alpha_2 + \dot{Y}_1 \dot{Y}_2 \alpha_3. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \prod_{k=1}^3 Y_k \dot{\beta}^* &= \dot{Y}_1 \dot{Y}_2 \dot{Y}_3 \dot{\beta}^* = \{[(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\gamma_3 - \omega^2(\varepsilon_1\gamma_2 + \varepsilon_2\gamma_1) \cdot \varepsilon_3] + \\ & i\omega[\gamma_3(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2) + \varepsilon_3(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)]\} \cdot \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \cdot \{[(\gamma_2\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_2\varepsilon_3)\alpha_1 + (\gamma_1\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_3)\alpha_2 + (\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\alpha_3] - \\ & - i\omega[(\varepsilon_3\gamma_2 + \varepsilon_2\gamma_3)\alpha_1 + (\varepsilon_3\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_3)\alpha_2 + (\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\alpha_3]\} \cdot \\ & R_e \{ \dot{Y}_1 \dot{Y}_2 \dot{Y}_3 \dot{\beta}^* \} = [(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2) \cdot \gamma_3 - \omega^2(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\varepsilon_3] \cdot \\ & \cdot [(\gamma_2\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_2\varepsilon_3)\alpha_1 + (\gamma_1\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_3)\alpha_2 + (\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\alpha_3] + \\ & + \omega^2[\gamma_3(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2) + \varepsilon_3(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)] \cdot \\ & \cdot [(\varepsilon_3\gamma_2 + \varepsilon_2\gamma_3)\alpha_1 + (\varepsilon_3\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_3)\alpha_2 + (\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\alpha_3]; \\ & I_m \{ \dot{Y}_1 \dot{Y}_2 \dot{Y}_3 \dot{\beta}^* \} = [(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2) \cdot \gamma_3 - \omega^2(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\varepsilon_3] \cdot \\ & \cdot (-\omega)[(\varepsilon_3\gamma_2 + \varepsilon_2\gamma_3)\alpha_1 + (\varepsilon_3\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_3)\alpha_2 + (\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\alpha_3] + \\ & + \omega[\gamma_3(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2) + \varepsilon_3(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)] \cdot \\ & \cdot [(\gamma_2\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_2\varepsilon_3)\alpha_1 + (\gamma_1\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_3)\alpha_2 + (\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\alpha_3]. \end{aligned} \quad (7)$$

Принимая во внимание (4) при принятых допущениях имеем следующие условия

$$\dot{Y}_1 = \gamma_1; \quad (8)$$

$$\dot{Y}_2 = i\omega\varepsilon_2; \quad (9)$$

$$\dot{Y}_3 = \gamma_3. \quad (10)$$

Тогда, в соответствии с (4), (5), (6), (7), (3) получаем

$$\dot{Y} = \frac{\dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3}{\dot{\beta}} = \frac{\gamma_1 i\omega\varepsilon_2 \gamma_3}{\dot{\beta}}; \quad (11)$$

$$\dot{\beta}^* = (\dot{Y}_2\dot{Y}_3\alpha_1 + \dot{Y}_1\dot{Y}_3\alpha_2 + \dot{Y}_1\dot{Y}_2\alpha_3)^* = (i\omega\varepsilon_2\gamma_3\alpha_1 + \gamma_1\gamma_3\alpha_2 + \gamma_1 i\omega\varepsilon_2\alpha_3)^* = [\gamma_1\gamma_3\alpha_2 - i\omega\varepsilon_2(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\gamma_1)]; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{\beta}^* &= i\omega\varepsilon_2\gamma_1\gamma_3[\gamma_1\gamma_3\alpha_2 - i\omega\varepsilon_2(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\gamma_1)] = \\ &= \omega^2\gamma_1\gamma_3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\gamma_1) + i\omega\varepsilon_2\gamma_1^2\gamma_3^2\alpha_2; \end{aligned} \quad (13)$$

$$R_e\{\dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{\beta}^*\} = \omega^2\varepsilon_2^2\gamma_1\gamma_3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\gamma_1); \quad (14)$$

$$I_m\{\dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{\beta}^*\} = \omega\varepsilon_2\gamma_1^2\gamma_3^2\alpha_2; \quad (15)$$

$$\operatorname{tg}\delta \approx \frac{\omega^2\varepsilon_2^2\gamma_1\gamma_3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\gamma_1)}{\omega\varepsilon_2\gamma_1^2\gamma_3^2\alpha_2} \approx \omega \frac{\varepsilon_2(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\gamma_1)}{\gamma_1^2\gamma_3^2\alpha_2}. \quad (16)$$

Выражение (3) после формальной подстановки в него  $\varepsilon_1 = 0$ ,  $\varepsilon_3 = 0$ ,  $\gamma_2 = 0$  должно совпадать с выражением (16), в чем можно убедиться, выполнив такую подстановку

$$\operatorname{tg}\delta \approx \frac{\omega^2[\gamma_3\varepsilon_2\gamma_1][\varepsilon_2(\gamma_3\alpha_1 + \gamma_1\alpha_3)]}{\omega[\gamma_3\varepsilon_2\gamma_1][\gamma_1\gamma_3\alpha_2]} \approx \omega \frac{\varepsilon_2(\gamma_3\alpha_1 + \gamma_1\alpha_3)}{\gamma_1\gamma_3\alpha_2}. \quad (17)$$

Последнее подтверждает правильность полученного приближенного выражения (16) для  $\operatorname{tg}\delta$  трехслойной изоляционной конструкции при условиях (8)...(10), когда  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  соответственно в слоях 1 и 3 не равны друг другу. Если эти проводимости равны между собой, то есть когда выполняются условия

$$\dot{Y}_1 = \dot{Y}_3 = \gamma_1 = \gamma_3 = \gamma. \quad (18)$$

$$\dot{Y}_2 = i\omega\varepsilon_2 = i\omega\varepsilon. \quad (19)$$

то выражение (17) можно упростить и представить в виде

$$\operatorname{tg}\delta \approx \omega \frac{\varepsilon\gamma(\alpha_1 + \alpha_3)}{\gamma_2\alpha_2} = f_1 f_2. \quad (20)$$

Таким образом, выражение для тангенса угла диэлектрических потерь в трехслойной изоляционной конструкции при выполнении условий (18), (19) можно представить в виде произведения двух функций, в котором первая функция  $f_1$  зависит только от параметров, характеризующих материал диэлектрика в слоях

$$f_1 = \omega\varepsilon/\gamma, \quad (21)$$

а вторая функция  $f_2$  зависит только от геометрических параметров этих слоев.

$$f_2 = (\alpha_1 + \alpha_3)/\alpha_2 = (\ln \frac{r_1}{r_0} + \ln \frac{r_3}{r_2}) / \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (22)$$

то есть является чисто геометрическим фактором для трехслойной изоляционной конструкции.

Исследуем зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от конструкции изоляции и рассмотрим такие основные случаи.

Случай 1. Пусть  $r_1$  стремится к  $r_0$  и  $r_2$  к  $r_3$ , что равнозначно бесконечному уменьшению толщины первого и третьего слоев, которые согласно (18) характеризуются только проводимостью  $\gamma$ . Одновременно при  $r_1 \rightarrow r_0$  и  $r_2 \rightarrow r_3$  толщина слоя 2, который согласно (19) характеризуется только реактивной проводимостью  $i\omega\varepsilon$ , будет неограниченно приближаться к толщине  $r_3 - r_0$  слоя всего диэлектрика, а сама трехслойная изоляция превращается из трехслойной в однослойную. Тогда при сколь угодно близких значениях  $r_1, r_0$  и  $r_2, r_3$  функция  $f_1$  будет ограниченной, отношения  $r_1/r_0$  и  $r_2/r_3$  будут стремиться к единице, натуральные логарифмы этих отношений – к нулю, а при фиксированных значениях  $r_0$  и  $r_3$  знаменатель (22), равный  $\ln r_2/r_1$  при  $r_2 \rightarrow r_3, r_1 \rightarrow r_0$  стремится к значению  $\ln r_0/r_3$  и остается величиной ограниченной. Тогда при неизменной угловой частоте  $\omega$  имеем

$$\lim_{\substack{r_1 \rightarrow r_0 \\ r_2 \rightarrow r_3}} \operatorname{tg} \delta = \lim_{\substack{r_1 \rightarrow r_0 \\ r_2 \rightarrow r_3}} f_1 f_2 = f_1 \lim_{\substack{r_1 \rightarrow r_0 \\ r_2 \rightarrow r_3}} \frac{\ln \frac{r_1}{r_0} + \ln \frac{r_3}{r_2}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = 0. \quad (23)$$

Последнее выражение показывает, что при неограниченном уменьшении толщин слоев 1 и 3 и увеличении при этом толщины слоя 2 до значения  $r_3 - r_0$  тангенс угла диэлектрических потерь стремится к нулю. Этот вывод физически прозрачен, так как изоляция из трехслойной с двумя диссипативными слоями превращается в однослойную без активных потерь.

Случай 2. В трехслойной изоляции толщина слоя 2, в котором отсутствует активная проводимость, стремится к нулю, а изоляция превращается из трехслойной в двухслойную, причем оба слоя 1 и 3 характеризуются только активной проводимостью. Тогда при ограниченной функции  $f_1$  имеем из (17) при конечном  $\omega\varepsilon_2$

$$\lim_{r_1 \rightarrow r_2} \operatorname{tg} \delta = \omega\varepsilon_2 \lim_{r_1 \rightarrow r_2} \frac{\gamma_3 \ln \frac{r_1}{r_0} + \gamma_1 \ln \frac{r_3}{r_2}}{\gamma_1 \gamma_3 \ln \frac{r_2}{r_1}} = \infty. \quad (24)$$

поскольку при конечных  $\gamma_1, \gamma_3$  и  $r_0, r_3$  числитель выражения (24) остается ограниченным, а его знаменатель – стремится к нулю.

Случай 3. В трехслойной изоляции толщина одного из слоев (1 или 3), который характеризуется только активной проводимостью, неограниченно

уменьшается. При этом изоляция в пределе превращается в двухслойную.

Если, например, неограниченно уменьшать толщину  $r_1 - r_0$  первого слоя, то из (17) получаем при конечных  $\gamma_3 = \gamma$  и  $\varepsilon_2 = \varepsilon$

$$\lim_{r_1 \rightarrow r_0} \operatorname{tg} \delta = \omega \varepsilon_2 \lim_{r_1 \rightarrow r_0} \frac{\gamma_3 \ln \frac{r_1}{r_0} + \gamma_1 \ln \frac{r_3}{r_2}}{\gamma_1 \gamma_3 \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\omega \varepsilon}{\gamma} \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (25)$$

При уменьшении до нуля толщины  $r_3 - r_2$  третьего слоя в трехслойной конструкции в пределе при  $r_2 \rightarrow r_3$ ,  $\gamma_1 = \gamma$  и  $\varepsilon_2 = \varepsilon$  получим, как можно видеть, тот же результат, который дает формула (25), то есть

$$\lim_{r_2 \rightarrow r_3} \operatorname{tg} \delta = \omega \varepsilon_2 \lim_{r_2 \rightarrow r_3} \frac{\gamma_3 \ln \frac{r_1}{r_0} + \gamma_1 \ln \frac{r_3}{r_2}}{\gamma_1 \gamma_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\omega \varepsilon}{\gamma} \frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (26)$$

К этому же результату приводит и формула (2) при  $r_2 \rightarrow r_3$ , то есть при условиях

$$\begin{aligned} \dot{Y}_2 &= i\omega \varepsilon_2 = i\omega \varepsilon; & \gamma_2 &= 0; \\ \dot{Y}_1 &= \gamma_1 = \gamma; & \varepsilon_1 &= 0. \end{aligned} \quad (27)$$

что дает после их подстановки в (2)

$$\lim_{r_2 \rightarrow r_3} \operatorname{tg} \delta = \frac{\omega^2 \varepsilon_2 \gamma_1 \alpha_1}{\omega [\varepsilon_2 \gamma_1 \alpha_2]} = \frac{\omega \varepsilon}{\gamma} \frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (28)$$

Выражения (26), (28) показывают, что и для двухслойной конструкции, в случае, когда один из слоев имеет только активную проводимость, а другой – чисто реактивную, тангенс угла диэлектрических потерь можно представить также подобно (20) в виде произведения двух функций, одна из которых  $f_1$  зависит только от свойств материалов, а другая  $f_2$  – является чисто геометрическим фактором, то есть

$$\operatorname{tg} \delta = f_1 f_2' = \frac{\omega \varepsilon}{\gamma} \frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (29)$$

а  $f_1$  и  $f_2'$ , соответственно, равны

$$f_1 = \omega \varepsilon / \gamma; \quad f_2' = \frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (30)$$

Таким образом, как для трехслойной изоляционной конструкции с двумя

диссипативными слоями с одинаковыми проводимостями, так и для двухслойной конструкции с одним диссипативным слоем функции  $f_1$ , зависящие от свойств материалов слоев, одинаковы. Функции  $f_2$  и  $f_2$ , зависящие от геометрических параметров, различны для этих двух изоляционных конструкций.

Наконец рассмотрим четырехслойную изоляционную конструкцию. Возьмем вначале случай, характерный для силовых кабелей, в которых на трехслойную пластмассовую изоляцию и проводящий экран по жиле – собственно изоляция – проводящий экран по изоляции дополнительно наложен слой из полупроводящего полотна так, что при толщинах слоев  $r_1 - r_0$ ;  $r_2 - r_1$ , их проводимости соответственно равны

$$\dot{Y}_1 = \gamma_1; \quad \dot{Y}_2 = i\omega\varepsilon_2; \quad \dot{Y}_3 = \gamma_3; \quad \dot{Y}_4 = \gamma_4. \quad (31)$$

Последовательно вычисляя по (4), (5), (6), (7) получаем

$$\dot{Y} = \frac{\prod_{k=1}^4 \dot{Y}_k}{\dot{\beta}} = \frac{\dot{Y}_1 \dot{Y}_2 \dot{Y}_3 \dot{Y}_4}{\dot{\beta}}; \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= \prod_{m=1}^4 \dot{Y}_m \sum_{k=1}^4 \dot{Y}_k^{-1} \alpha_k = \dot{Y}_1 \dot{Y}_2 \dot{Y}_3 \dot{Y}_4 \left( \frac{1}{\dot{Y}_1} \alpha_1 + \frac{1}{\dot{Y}_2} \alpha_2 + \frac{1}{\dot{Y}_3} \alpha_3 + \frac{1}{\dot{Y}_4} \alpha_4 \right) = \\ &= (\dot{Y}_2 \dot{Y}_3 \dot{Y}_4 \alpha_1 + \dot{Y}_1 \dot{Y}_3 \dot{Y}_4 \alpha_2 + \dot{Y}_1 \dot{Y}_2 \dot{Y}_4 \alpha_3 + \dot{Y}_1 \dot{Y}_2 \dot{Y}_3 \alpha_4) = \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} &= (i\omega\varepsilon_2 \gamma_3 \gamma_4 \alpha_1 + \gamma_1 \gamma_3 \gamma_4 \alpha_2 + \gamma_1 i\omega\varepsilon_2 \gamma_4 \alpha_3 + \gamma_1 i\omega\varepsilon_2 \gamma_3 \alpha_4); \\ \dot{\beta}^* &= [\gamma_1 \gamma_3 \gamma_4 \alpha_2 - i\omega\varepsilon_2 (\gamma_3 \gamma_4 \alpha_1 + \gamma_1 \gamma_4 \alpha_3 + \gamma_1 \gamma_3 \alpha_4)]; \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \prod_{k=1}^4 \dot{Y}_k \dot{\beta}^* &= \gamma_1 i\omega\varepsilon_2 \gamma_3 \gamma_4 [\gamma_1 \gamma_3 \gamma_4 \alpha_2 - i\omega\varepsilon_2 (\gamma_3 \gamma_4 \alpha_1 + \gamma_1 \gamma_4 \alpha_3 + \gamma_1 \gamma_3 \alpha_4)] = \\ &= [\omega^2 \varepsilon_2 \gamma_1 \gamma_3 \gamma_4 (\gamma_3 \gamma_4 \alpha_1 + \gamma_1 \gamma_4 \alpha_3 + \gamma_1 \gamma_3 \alpha_4) + i\omega\varepsilon_2 \gamma_1^2 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4^2 \alpha_2]; \end{aligned} \quad (35)$$

$$R_e \{ \dot{Y}_1 \dot{Y}_2 \dot{Y}_3 \dot{Y}_4 \dot{\beta}^* \} = \omega^2 \varepsilon_2 \gamma_1 \gamma_3 \gamma_4 (\gamma_3 \gamma_4 \alpha_1 + \gamma_1 \gamma_4 \alpha_3 + \gamma_1 \gamma_3 \alpha_4). \quad (36)$$

После чего получаем выражение для тангенса угла диэлектрических потерь с учетом (36)

$$I_m \{ \dot{Y}_1 \dot{Y}_2 \dot{Y}_3 \dot{Y}_4 \dot{\beta}^* \} = \omega\varepsilon_2 \gamma_1^2 \gamma_3^2 \gamma_4^2 \alpha_2, \quad (37)$$

которое, как видно, при бесконечно тонком слое 4, то есть при  $\alpha_4 = \ln r_4/r_3$  после сокращений переходит в выражение

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R_e \{ \prod_{k=1}^n \dot{Y}_k \dot{\beta}^* \}}{I_m \{ \prod_{k=1}^n \dot{Y}_k \dot{\beta}^* \}} = \frac{\omega\varepsilon_2 (\gamma_3 \gamma_4 \alpha_1 + \gamma_1 \gamma_4 \alpha_3 + \gamma_1 \gamma_3 \alpha_4)}{\gamma_1^2 \gamma_3^2 \gamma_4^2 \alpha_2} = \omega\varepsilon_2 \frac{\gamma_3 \alpha_1 + \gamma_1 \alpha_3}{\gamma_1 \gamma_3 \alpha_2}. \quad (38)$$

полностью совпадающее с выражением (17) для тангенса угла диэлектрических потерь трехслойной конструкции, что подтверждает правильность формулы (37). Если все проводимости  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  равны между собой и равны  $\gamma$ , то при  $\varepsilon_2 = \varepsilon$  получаем из (37).

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega \varepsilon}{\gamma} \frac{\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4}{\alpha_2} = f_1 f_2'' , \quad (39)$$

то есть тангенс угла диэлектрических потерь в четырехслойной изоляции можно также представить в виде произведения двух функций  $f_1$  и  $f_2''$ , из которых первая зависит от свойств материалов  $f_1 = \omega \varepsilon / \gamma$ , а вторая является геометрическим фактором и равна

$$f_2'' = \frac{\ln \frac{r_1}{r_0} + \ln \frac{r_3}{r_2} + \ln \frac{r_4}{r_3}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} . \quad (40)$$

Проводя те же рассуждения для случая, когда параметры имеют значение

$$\dot{Y}_1 = \gamma_1 ; \quad \dot{Y}_2 = i\omega \varepsilon_2 ; \quad \dot{Y}_3 = \gamma_3 ; \quad \dot{Y}_4 = i\omega \varepsilon_4 ,$$

характерное для самонесущих защищенных изолированных проводов, по аналогии с предыдущим, получаем

$$\dot{\beta} = (i\omega \varepsilon_2 \gamma_3 i\omega \varepsilon_4 \alpha_1 + \gamma_1 \gamma_3 i\omega \varepsilon_4 \alpha_2 + \gamma_1 i\omega \varepsilon_2 \gamma_3 i\omega \varepsilon_4 + \gamma_1 i\omega \varepsilon_2 \gamma_3 \alpha_4) = \\ [-\omega^2 \varepsilon_2 \varepsilon_4 (\gamma_3 \alpha_1 + \gamma_1 \alpha_3) - i\omega \gamma_1 \gamma_3 (\varepsilon_4 \alpha_2 + \varepsilon_2 \alpha_4) + i\omega (\varepsilon_4 \gamma_1 \gamma_3 \alpha_2 + \varepsilon_2 \gamma_1 \gamma_3 \alpha_4)] ; \quad (42)$$

$$\dot{\beta}^* = [-\omega^2 \varepsilon_2 \varepsilon_4 (\gamma_3 \alpha_1 + \gamma_1 \alpha_3) - i\omega \gamma_1 \gamma_3 (\varepsilon_4 \alpha_2 + \varepsilon_2 \alpha_4)] ; \quad (43)$$

$$\prod_{k=1}^4 \dot{Y}_k \dot{\beta}^* = \gamma_1 i\omega \varepsilon_2 \gamma_3 i\omega \varepsilon_4 \cdot \dot{\beta}^* = -\omega^2 \varepsilon_2 \varepsilon_4 \gamma_1 \gamma_3 \dot{\beta}^* = \\ = \omega^2 \varepsilon_2 \varepsilon_4 \gamma_1 \gamma_3 [\omega^2 \varepsilon_2 \varepsilon_4 (\gamma_3 \alpha_1 + \gamma_1 \alpha_3) + i\omega \gamma_1 \gamma_3 (\varepsilon_4 \alpha_2 + \varepsilon_2 \alpha_4)] = \\ = \omega^4 (\varepsilon_2 \varepsilon_4)^2 \gamma_1 \gamma_3 (\gamma_3 \alpha_1 + \gamma_1 \alpha_3) + i\omega^3 (\gamma_1 \gamma_3)^2 \varepsilon_2 \varepsilon_4 (\varepsilon_4 \alpha_2 + \varepsilon_2 \alpha_4) ; \quad (44)$$

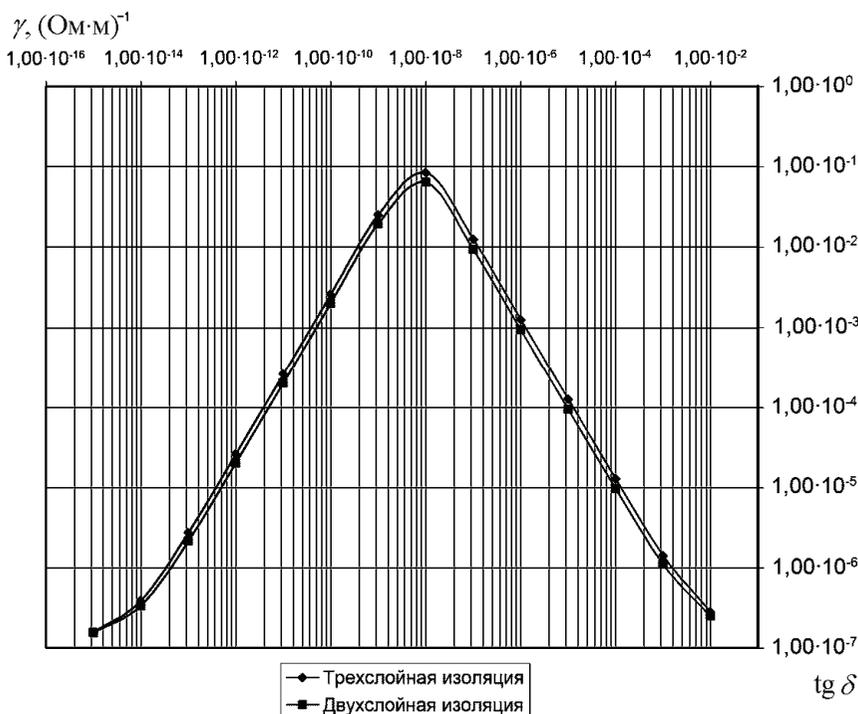
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega^4 (\varepsilon_2 \varepsilon_4)^2 \gamma_1 \gamma_3 (\gamma_3 \alpha_1 + \gamma_1 \alpha_3)}{\omega^3 (\gamma_1 \gamma_3)^2 \varepsilon_2 \varepsilon_4 (\varepsilon_4 \alpha_2 + \varepsilon_2 \alpha_4)} = \frac{\omega \varepsilon_2 \varepsilon_4 (\gamma_3 \alpha_1 + \gamma_1 \alpha_3)}{\gamma_1 \gamma_3 (\varepsilon_4 \alpha_2 + \varepsilon_2 \alpha_4)} . \quad (45)$$

Здесь под  $r_4$  при приближенном вычислении  $\alpha_4 = \ln r_4 / r_3$  следует понимать очевидно расстояние от центра провода до ближайшего заземленного объекта, а значение диэлектрической проницаемости воздуха  $\varepsilon_4$  следует принять равной диэлектрической постоянной  $\varepsilon_0$  вакуума. В заключение заметим, что последнее выражение нельзя представить в виде произведения двух функций. Это обусловлено тем, что даже при равенстве проводимостей  $\gamma_1 = \gamma_3$ , равенство диэлектрических проницаемостей  $\varepsilon_2 = \varepsilon_4$  не может быть достигнуто ни при каких условиях, так как  $\varepsilon_4$  остается всегда строго меньше  $\varepsilon_2$ .

В заключение рассмотрим вопрос о влиянии проводимости экранов по жиле и по изоляции на величину тангенса угла диэлектрических потерь в кабелях высокого и сверхвысокого напряжения. В их конструкции на экран по изоляции может накладываться водонабухающее полотно. Однако его толщиной, по сравнению с толщиной экрана по изоляции можно пренебречь и считать конструкцию трехслойной.

Как показывает анализ, при неизменных параметрах собственно изоляции

онного слоя  $\varepsilon_2 = 2,3 \cdot \varepsilon_0$ ;  $\gamma_2 = 10^{-15}$ , тангенс угла диэлектрических потерь согласно (3) имеет максимум (см. рисунок). Такой же максимум для  $\text{tg}\delta$  наблюдается и в двухслойной конструкции «полупроводящий экран по жиле – изоляция», как это следует из (2).



Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от проводимости экранов по жиле  $\gamma_1$  и по изоляции  $\gamma_3$  в трехслойной конструкции (—◆—), а также проводимости экрана по жиле в двухслойной конструкции (—■—) сердечника кабеля (радиус по жиле  $r_0 = 13$  мм, толщина экрана по жиле и по изоляции 2 мм, радиус экрана по жиле 15 мм, радиус по изоляции – 39,5 мм,  $\gamma_1 = \gamma_3$ ,  $\gamma_2 = 10^{-15}$  (Ом·м) $^{-1}$ ;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 2,3 \cdot \varepsilon_0$

Наличие максимума на кривой  $\text{tg}\delta$  можно объяснить следующим образом. Если  $\gamma_1$  и  $\gamma_3$  неограниченно уменьшать, то свойства полупроводящих экранов будут стремиться к свойствам высококачественного полиэтилена с низким значением  $\text{tg}\delta$ . При неограниченном увеличении  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , свойства полупроводящих экранов будут стремиться к свойствам хорошего проводника, то есть к свойствам материала токопроводящей жилы и проводящего металлического экрана, между которыми будет находиться слой высококачественного полиэтилена с низким значением  $\text{tg}\delta$ . Так как значение  $\text{tg}\delta$  не зависит от объема диэлектрика, то при средних значениях проводимости полупроводящих экранов

$\gamma_1$  и  $\gamma_3$  будет наблюдаться максимум тангенса угла диэлектрических потерь для трехслойной конструкции с двумя проводящими экранами. Эти же рассуждения будут справедливыми и для случая конструкции с одним полупроводящим экраном.

**Выводы.** При выборе проводимости пластмассовых экранов по жиле и по изоляции в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6...330 кВ необходимо учитывать следующее.

1. Сглаживание электрического поля на микровыступах полиэтиленовой изоляции и токопроводящих экранов по жиле и изоляции происходит если толщина экранов составляет не менее 1 мм, а их проводимость  $\gamma_1, \gamma_3$ , не опускается ниже  $10^{-6}$  (Ом·м)<sup>-1</sup> при 20° С [9].

2. При достижении длительно допустимых токов в режиме перегрузки температура кабеля может достигать 130° С. При этом проводимость экранов может измениться на три порядка от  $10^{-3}$  до  $10^{-6}$  (Ом·м)<sup>-1</sup> [9]. Таким образом для того, чтобы полупроводящие экраны не потеряли своего главного назначения по выравниванию электрического поля на выступах, следует выбирать их электропроводность  $\gamma_1, \gamma_3$  не менее  $10^{-3}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>, что соответствует объемному удельному сопротивлению 1000 Ом·м.

3. Из рисунка можно видеть, что при значении проводимости экранов  $\gamma = 10^{-3}$  (Ом·м)<sup>-1</sup> значение тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  составляет соответственно  $1,43 \cdot 10^{-6}$  в трехслойной конструкции с двумя экранами и  $1,1 \cdot 10^{-6}$  в двухслойной конструкции кабеля одним экраном по жиле. В то же время известно, например, что для трансформаторного масла с удельной электропроводностью  $\gamma = 10^{-12}$  (Ом·м)<sup>-1</sup> и  $\varepsilon = 2,2$ , тангенс угла диэлектрических потерь на частоте  $10^6$  Гц из формулы  $\gamma/\omega\varepsilon$ , то есть с учетом только тока проводимости, получается равным примерно  $10^{-6}$ , тогда как непосредственные измерения дают значение  $\text{tg}\delta \approx 10^{-3}$  [10]. Это обстоятельство как раз и обусловлено неучетом токов поляризации, адсорбции и потерь ионизации. Теоретический учет этих факторов выходит далеко за рамки настоящей работы. Более того, такая задача не решена в физике диэлектриков и до настоящего времени. Попытки теоретически учесть свойства неоднородных диэлектриков, в частности, были предприняты в [9]. Суть метода состоит в том, что диэлектрик представляется как некоторый композит со стохастической структурой. В нем выделялась элементарная ячейка, содержащая характерную неоднородность (водный триинг). В объеме ячейки решалась полевая задача и определялись эффективные характеристики ячейки, в частности, комплексная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ . Далее полагалось, что значение этой проницаемости приближенно равно проницаемости диэлектрика в целом. Так, при нормальных условиях, на частоте около 50 Гц были получены значения  $\varepsilon' \approx 2,3$  и  $\varepsilon'' \approx 2,3 \cdot 10^{-3}$ , что дает значение тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta \approx \varepsilon''/\varepsilon' \approx 10^{-3}$ . Это значение по порядку совпадает с допустимым значением  $\text{tg}\delta$  для кабелей СВН  $0,3 \cdot 10^{-3}$  и  $10^{-3}$  при температуре 20° С и 90° С соответственно. Отсюда можно сделать вывод, что для нормальной работы кабелей СВН, для которых  $\text{tg}\delta$  нормируется и не должен превышать значения  $10^{-3}$  сле-

дует выбирать значение проводимости проводящих пластмассовых экранов не менее  $10^{-3} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ . При этом полученное теоретическое значение  $\text{tg}\delta \sim 10^{-6}$ , исходя из решения полевой задачи в диэлектрике с учетом только токов проводимости служит нижней его оценкой при выборе необходимой удельной проводимости материала проводящих пластмассовых экранов  $\gamma \geq 10^{-3} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ . Фактическое значение тангенса угла диэлектрических потерь в изоляции кабеля можно определить только практически путем его измерения с применением, например, мостового метода

**Список литературы:** 1. Патент на винахід № 83826, Україна. Здатна до зшивання композиція. МПК С08L 83/04/ *Василець Л.Г., Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Ганьшина Л.В., Антоненц Ю.П., Золотарьов В.В.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 01.11.05, опубліковано 26.08.08., бюл. № 16. 2. Патент на винахід № 84012, Україна. Здатна до зшивання композиція. МПК С08L 23/00 - / *Василець Л.Г., Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Ганьшина Л.В., Антоненц Ю.П., Золотарьов В.В.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 01.11.05, опубліковано 10.09.08., бюл. № 17. 3. Патент на винахід № 85910, Україна. Кабель контрольний. МПК Н01 В 7/00 - / *Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Антоненц Ю.П., Василець Л.Г., Золотарьов В.В.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 23.05.07, опубліковано 25.11.08., бюл. № 22. 4. Патент на винахід № 83912, Україна. Кабель силовий вогнестійкий. МПК Н01 В 9/00 - / *Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Антоненц Ю.П., Василець Л.Г., Золотарьов В.В.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 23.05.07, опубліковано 25.11.08., бюл. № 22. 5. Патент на корисну модель № 39644, Україна. Потужний високовольтний кабель. МПК Н01 В 7/02-/ *Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Антоненц Ю.П., Золотарьов В.В., Чопов Є.Ю., Обозний А.Л., Науменко О.А., Чайка В.Д.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 01.08.08, опубліковано 10.03.09., бюл. № 5. 6. Патент на корисну модель № 39645, Україна. Високовольтний кабель з волоконно-оптичним термодатчиком. МПК Н01 В 7/02-/ *Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Антоненц Ю.П., Золотарьов В.В., Чопов Є.Ю., Обозний А.Л., Науменко О.А., Чайка В.Д.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 01.08.08, опубліковано 10.03.09., бюл. № 5. 7. Патент на корисну модель № 38514, Україна. Струмопровідна жила. МПК Н02 Н 7/04-/ *Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Антоненц Ю.П., Золотарьов В.В., Чопов Є.Ю., Обозний А.Л., Науменко О.А., Чайка В.Д.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 01.08.08, опубліковано 12.01.09., бюл. № 1. 8. *Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Золотарев В.В., Антоненц Ю.А., Науменко А.А.* Тангенс угла диэлектрических потерь многослойных сшитых изоляционных конструкций // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ». – 2011.– № 49.– С. 64-73. 9. *Шидловский А.К., Щерба А.А.* Научно-техническое обеспечение анализа надежности и экологичности высоковольтных кабелей на напряжение до 110 кВ. Институт электродинамики НАН Украины. – Отчет о НИР. Г.р. № 0106U010708. – 2006. – 242 с. 10. *Сиротинский Л.И.* и др. Техника высоких напряжений. – М-Л.: Госэнергоиздат. – 1940. – 247 с.

*Поступила в редколлегию 02.03.2012.*

**И.Е.КАЛУГИНА**, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

**А.Г.ТЕМНИКОВ**, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

**С.В.ГУНДАРЕВА**, инженер, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

## **ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВЕРШИНЫ ОБЪЕКТА И МОЛНИЕОТВОДА НА ВЕРОЯТНОСТЬ ПОРАЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ МОЛНИЕЙ**

Описана імовірнісна методика розрахунку блискавкозахисту зосереджених об'єктів, що базується на фізичних уявленнях про параметри і закономірності розвитку блискавки і поразки нею наземних об'єктів. Представлені і проаналізовані результати числових експериментів з дослідження впливу форми вершини зосередженого об'єкта і стрижневого блискавководводу на їх імовірність ураження розрядом блискавки.

Probabilistic method of the lightning protection calculation of compact slender objects based on the physical representations about the parameters and laws of a lightning development and ground object lightning affection is described. Results of the numerical experiments on the investigations of influence of the compact slender object and lightning rod tip form on a probability of its lightning discharge affection have been presented and analyzed.

Описана вероятностная методика расчета молниезащищенности сосредоточенных объектов, базирующаяся на физических представлениях о параметрах и закономерностях развития молнии и поражения ею наземных объектов. Представлены и проанализированы результаты численных экспериментов по исследованию влияния формы вершины сосредоточенного объекта и стержневого молниеотвода на их вероятность поражения разрядом молнии.

**Введение.** Современные высокие требования к качеству производства и электроснабжения, а также внедрение в промышленность микропроцессорной техники поднимают необходимый уровень требований к защите объектов электроэнергетики, связи, транспорта, промышленных и гражданских зданий и сооружений от опасных воздействий прямого удара молнии.

Практика молниезащиты промышленных (в том числе электроэнергетических) объектов продолжает опираться на нормы, правила и технические решения, принятые в основном еще в прошлом веке. Их рекомендации уже не позволяют проектировать системы молниезащиты с достаточной степенью надежности. Усугубляет положение малая статистика закономерностей поражаемости молнией объектов, без которой трудно выявить недостатки существующих решений и предложить более эффективные.

Поэтому вопросы расчета и проектирования молниезащиты становятся все более актуальными [1]. Решением является разработка и развитие достоверных методик расчета показателей молниезащищенности объектов, имеющих в своей основе физически обоснованное описание процесса поражения их молнией.

Повышение надежности возможно лишь при условии дальнейшего уг-

лублинного развития физических основ молниезащиты и обоснования дифференцированного подхода к выбору средств защиты в зависимости от тяжести ожидаемых последствий при поражении различных объектов молнией. В частности, в настоящее время нигде в нормативной документации [2-4] не рассматривается влияние формы молниеотвода и защищаемого объекта на их вероятность поражения. Считается, что объект, полностью размещенный внутри зоны защиты молниеотвода, защищен с заданной надежностью независимо от его формы.

В то же время в результате экспериментальных исследований установлено, что такое влияние существует [5]. Полевые исследования [6] показали существенное влияние формы вершины сосредоточенного объекта в виде мачты на поражение его разрядом молнии. Наибольшая поражаемость наблюдалась для мачт с вершиной, имеющей промежуточную форму между острой и практически гладкой. Влияние формы вершины объекта и молниеотвода также отмечалось, например, в модельных экспериментах с искусственными облаками заряженного водного аэрозоля [7].

Более того, на принципе изменения радиуса вершины молниеотвода делаются попытки увеличения эффективности его действия. Сейчас уже предлагаются и патентуются технические решения по влиянию на вероятность поражения объектов и на рост эффективности работы молниеотводов через изменение как формы вершины молниеотвода (например, применение системы тороидальных экранов), так и через расположение на вершине объектов металлических конструкции специфической формы [8].

В связи с этим актуальными являются исследования влияния формы вершины объекта и молниеотвода на эффективность молниезащиты сосредоточенных объектов на основе вероятностного подхода. В настоящее время на кафедре Техники и электрофизики высоких напряжений Национального исследовательского университета «МЭИ» разработана вероятностная методика расчета молниепоражаемости объектов, базирующаяся на физических представлениях о параметрах и закономерностях развития молнии и поражения ею наземных объектов [9-12].

## **1 Основные положения методики**

Методика развивает традиционный вероятностный подход оценки молниезащищенности наземных объектов с учетом процесса развития нисходящего лидера молнии и поражения им наземного объекта. Принятая модель ориентации молнии на объект базируется на существующих физических представлениях о параметрах и закономерностях развития молнии [13], [14]. Условно этот процесс можно разделить на два этапа: до ориентации лидера на объект и собственно сам процесс поражения молнией объекта.

Нисходящий лидер рассматривается как вертикальный или наклонный цилиндрический стержень со сферическим нижним окончанием. Распределение заряда по каналу лидера моделируется линейным зарядом с постоянной плотностью  $\tau_d$  и точечным зарядом головки  $q_r$ , согласно гипотезе нейтрализации связанными с амплитудой тока обратного разряда молнии [15].



где  $h$  – высота объекта;  $S$  – расстояние от объекта до некоторой точки вблизи него;  $U_{50\%}$  – пятидесятипроцентное разрядное напряжение, необходимое для пробоя воздушного промежутка  $S$ .

Наличие разбросов пробивных напряжений промежутков делает возможным возникновение встречного лидера с любого из исследуемых объектов с некоторой вероятностью.

В случае исследования молниезащиты сосредоточенных объектов необходимо рассматривать задачу в рамках трехмерной модели. Совокупность положений головки лидера, при которых молния может ударить в систему наземных объектов со сколь угодно малой вероятностью, представляет собой объемную область, напрямую зависящую от вида трехмерной системы координат (рис. 1). При каждом положении головки лидера определяется минимальный ток молнии  $I_{\text{м min}}$ , при котором молния обязательно ударит в один из наземных электродов, и вероятность его появления [15]. При этом токе методом эквивалентных зарядов рассчитываются разности потенциалов на рассматриваемых промежутках  $S$  и вероятности возникновения встречного лидера с каждого из рассматриваемых объектов [12].

Таким образом, при каждом положении головки лидера определяется вероятность удара молнии в объект при условии, что она не ударит в молниеотвод или землю. Далее результат суммируется по ячейкам, и определяется общее число ударов молнии в объект  $N_{\text{уд}}$  за определенный промежуток времени, а также общая вероятность прорыва молнии к объекту через защиту молниеотводов  $P_{\text{пр}}$ .

## **2 Влияние характеристик объекта и молниеотвода на поражение их разрядом молнии**

Определение влияния характеристик молниеотвода и самого объекта (в первую очередь, формы и радиусов кривизны их вершин) на вероятность поражения его разрядом молнии сейчас является одним из основных направлений в области физики молнии и молниезащиты [16].

В первой серии численных экспериментов рассматривается простейшая система сосредоточенных наземных объектов состоящая из защищаемого объекта в виде вертикального стержневого электрода высотой  $h_0$  с радиусом кривизны вершины  $r_0$  и одиночного стержневого молниеотвода высотой  $h_m$  с радиусом кривизны вершины  $r_m$ , находящегося на расстоянии  $d$  от объекта (рис. 2).

Для определения влияния радиусов вершин объекта и молниеотвода на вероятность поражения их разрядом молнии рассматриваются два расчетных случая. Объект высотой 7 метров ( $h_0 = 7$  м) и молниеотвод высотой 15 метров ( $h_m = 15$  м) находятся на расстоянии 5 и 15 метров ( $d_1 = 5$  м,  $d_2 = 15$  м) друг от друга.

Для каждого расчетного случая по представленной ранее вероятностной методике проведен численный эксперимент, включающий в себя две серии расчетов: 1) при изменении радиуса вершины объекта при фиксированном радиусе вершины молниеотвода ( $r_m = 1$  см); 2) при изменении радиуса вершины молниеотвода при фиксированном радиусе вершины защищаемого объекта

( $r_0 = 1$  см). Выбранный для расчетов диапазон радиусов вершин рассматриваемых электродов охватывает наиболее распространенные значения радиусов вершин реальных молниеприемников:  $r = (0,3 \div 10)$  см.

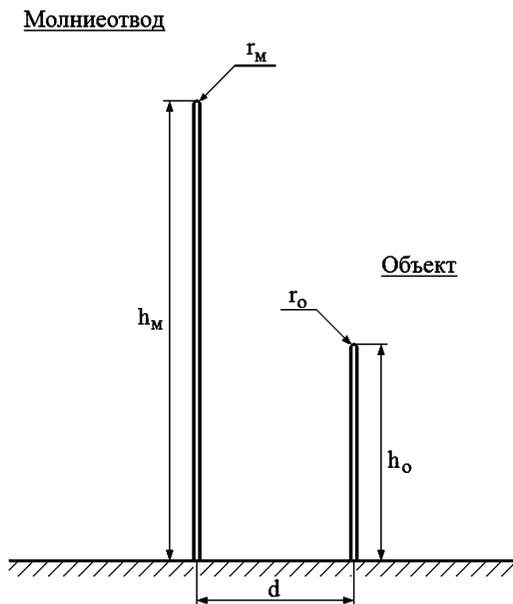


Рисунок 2 – Исследуемая система наземных объектов

Результаты расчетов по влиянию радиусов вершин сосредоточенного объекта и стержневого молниеотвода на вероятность их поражения разрядом молнии представлены на рис. 3-6.

Проведенные численные эксперименты и анализ полученных результатов показали следующее. С увеличением радиуса вершины объекта при фиксированном значении радиуса вершины молниеотвода вероятность прорыва молнии к объекту уменьшается, а вероятность удара молнии в стержневой молниеотвод растет (см. рис. 3-6). Такие зависимости могут быть связаны с тем, что для используемого критерия возникновения восходящего встречного лидерного разряда с наземного объекта (1) существенную роль играет расположение головки нисходящего лидера относительно рассматриваемых промежутков  $S$  вблизи вершин объекта и молниеотвода.

Чем ближе объект находится к молниеотводу, тем сильнее различие в радиусах кривизны вершины объекта и вершины молниеотвода отражается на изменении показателей его молниезащищенности. При  $d = 5$  м при изменении радиуса вершины объекта от 0,3 см до 10 см вероятность поражения его разрядом молнии уменьшается на 6,7 % (см. рис. 3, б). В то же время при существенном увеличении расстояния между объектом и молниеотводом ( $d = 15$  м) расчетная вероятность поражения объекта снижается только на 5,38 % (см. рис. 5, б).

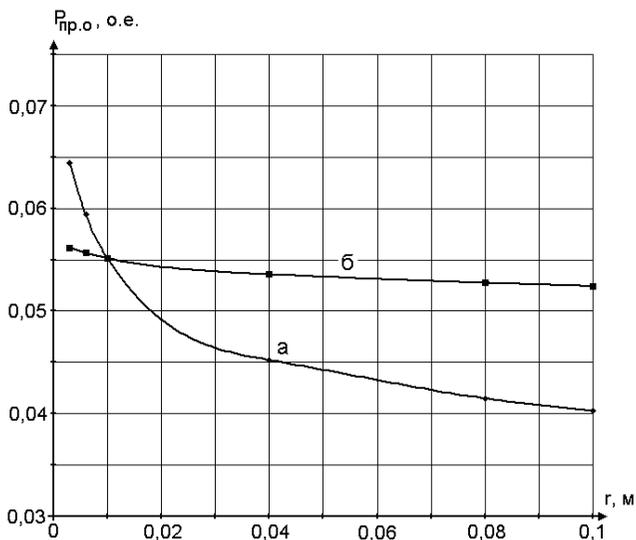


Рисунок 3 – Зависимость вероятности удара молнии в объект от радиуса его вершины или вершины молниеотвода (при расстоянии между объектами  $d = 5$  м):  
*a* – зависимость от радиуса вершины молниеотвода;  
*б* – зависимость от радиуса вершины объекта

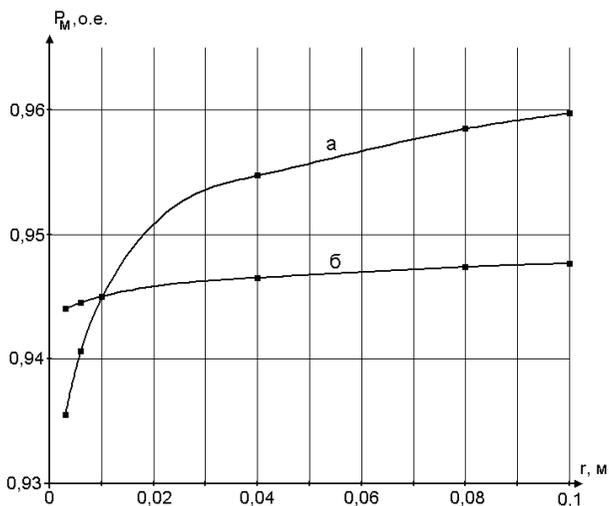


Рисунок 4 – Зависимость вероятности удара молнии в молниеотвод от радиуса его вершины или вершины объекта (при расстоянии между объектами  $d = 5$  м):  
*a* – зависимость от радиуса вершины молниеотвода;  
*б* – зависимость от радиуса вершины объекта

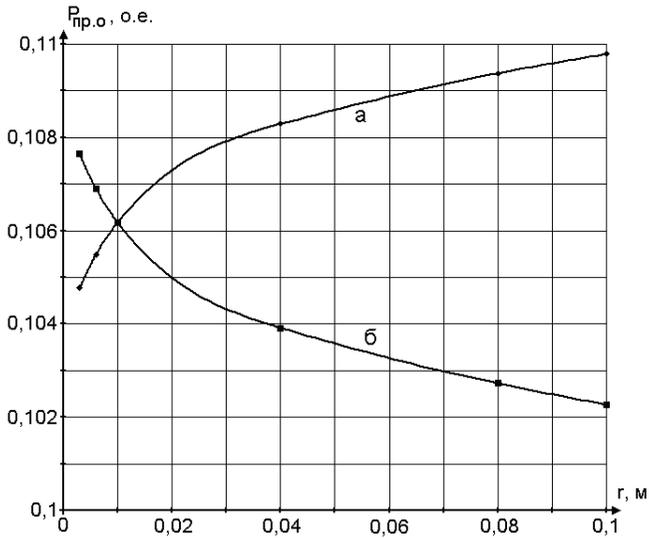


Рисунок 5 – Зависимость вероятности удара молнии в объект от радиуса его вершины или вершины молниеотвода (при расстоянии между объектами  $d = 15$  м):  
*a* – зависимость от радиуса вершины молниеотвода;  
*б* – зависимость от радиуса вершины объекта

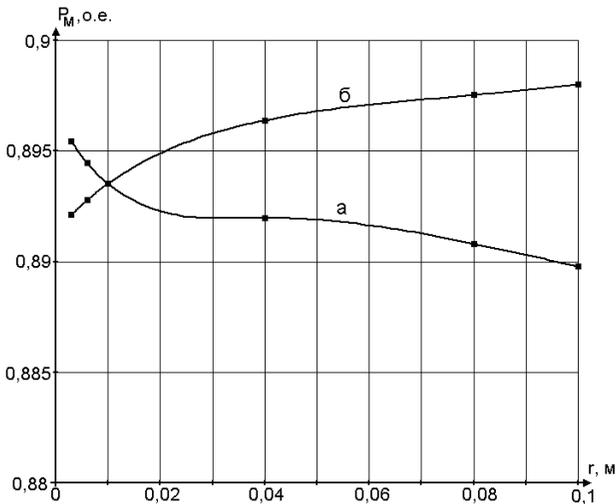


Рисунок 6 – Зависимость вероятности удара молнии в молниеотвод от радиуса его вершины или вершины объекта (при расстоянии между объектами  $d = 15$  м):  
*a* – зависимость от радиуса вершины молниеотвода;  
*б* – зависимость от радиуса вершины объекта

Необходимо отметить, что при изменении радиуса вершины молниеотвода в том же диапазоне для фиксированного радиуса вершины объекта в случае, когда объект находится рядом с молниеотводом, наблюдается существенное снижение (на 62,5 %) вероятности поражения защищаемого объекта (см. рис. 3, *a*). А при существенном увеличении расстояния между объектом и молниеотводом ( $d = 15$  м) расчетная вероятность поражения объекта, наоборот, даже немного растет на 4,77 % (см. рис. 5, *a*).

Аналогичные, по характеру, тенденции наблюдались и для зависимостей вероятности удара молнии в молниеотвод от радиуса его вершины или вершины защищаемого объекта (см. рис. 4, б). В случае увеличения радиуса вершины молниеотвода, находящегося достаточно близко от объекта ( $d = 5$  м), в указанном выше диапазоне наблюдается рост вероятности удара молнии в молниеотвод на 2,56 % (рис. 4, *a*), однако количество ударов молнии в молниеотвод становится меньше. При этом, как отмечено выше, существенно уменьшается вероятность поражения молнией защищаемого сосредоточенного объекта. Это может быть связано со следующим. При увеличении радиуса кривизны вершины молниеотвода электрическое поле у его вершины становится более однородным, что, согласно критерию (1), приводит к увеличению величины тока молнии, необходимого для образования встречного лидера с молниеотвода, и, соответственно, к уменьшению числа ударов в него молнии. В то же время при близком расположении объекта и защищающего его стержневого молниеотвода заряды, наводимые на молниеотводе нисходящим лидером молнии, оказывают влияние на электрическое поле вблизи вершины объекта (частично экранируя его), что затрудняет возникновение встречного лидера с защищаемого объекта. Более того, расчеты показали, что увеличение радиуса вершины молниеотвода приводит к уменьшению ударов молнии во всю систему возвышающихся объектов. В случае увеличения расстояния между объектом и защищающим его стержневым молниеотводом взаимное влияние наведенных на заземленных электродах зарядов становится существенно меньше. В результате, наблюдается увеличение доли ударов в объект, а влияние радиуса вершины молниеотвода на вероятность его поражения молнией становится менее ярко выраженной (см. рис. 5, б).

Во второй серии численных экспериментов по исследованию влияния формы защищаемого объекта на параметры его молниезащищенности были выполнены расчеты по вероятностной методике для систем наземных электродов, в которых защищаемые объекты имели различную конфигурацию вершины:

- объект в виде стержня с полусферической вершиной (далее стержень) (см. рис. 2);
- сосредоточенный стержневой объект с тороидальной вершиной, выполненной из цилиндрического проводника (рис. 7).

Система электродов состояла из молниеотвода высотой  $h_m = 20$  м и радиусом кривизны вершины  $r_m = 0,008$  м. Защищаемый объект располагался на расстоянии  $d = 6$  м от него. В расчетах анализировались два значения радиуса тора:  $R_{01} = 0,1$  м и  $R_{02} = 1,0$  м. Радиус сечения цилиндрического проводника принимался равным  $r_k = 0,008$  м.

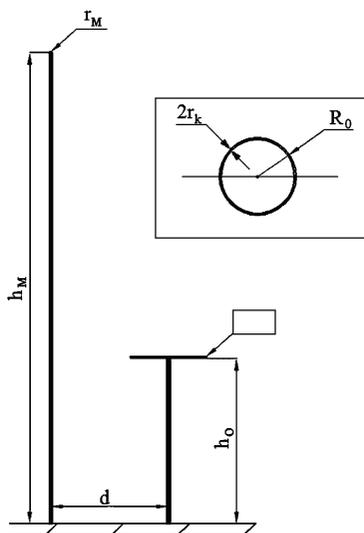


Рисунок 7 – Сосредоточенный стержневой объект с тороидальной вершиной

Таблица 1 – Влияние формы объекта на показатели молниезащищенности

$h_0$ , м	5,0	10,0	15,0	20,0
Стержень	$8,4663 \cdot 10^{-5}$	$4,5900 \cdot 10^{-2}$	$3,9540 \cdot 10^{-1}$	$5,0002 \cdot 10^{-1}$
Тор ( $R_{01}=0,1$ м)	$9,0894 \cdot 10^{-5}$	$4,6472 \cdot 10^{-2}$	$3,9632 \cdot 10^{-1}$	$5,0062 \cdot 10^{-1}$
Тор ( $R_{02}=1$ м)	$1,5904 \cdot 10^{-4}$	$5,0576 \cdot 10^{-2}$	$4,0388 \cdot 10^{-1}$	$5,0673 \cdot 10^{-1}$

При проведении расчетов положение вершины объекта менялось по высоте от 5 м до 20 м. Результаты численного эксперимента представлены в таблице. На рис. 8 показаны зависимости вероятности прорыва молнии на защищаемый объект от его высоты для исследуемых форм вершины объекта.

Как видно из зависимостей на рис. 8, стержневой объект с тороидальной вершиной имеет большую вероятность прорыва на него молнии, чем объект с полусферической вершиной с малым радиусом, и разница между значениями увеличивается при увеличении радиуса тора. Таким образом, расчеты по вероятностной методике на основе критерия возникновения восходящего встречного лидерного разряда с наземного объекта (1) показали существенное влияние формы и размеров защищаемого объекта на эффективность его защиты стержневыми молниеотводами. Такие результаты коррелируются с отмечаемой в большинстве современных работ по молниезащите необходимостью учета такого влияния (например, в [17] или в [18]).

Ключевым моментом для учета влияния формы вершины защищаемого объекта и стержневого молниеотвода на эффективность молниезащиты является формулирование наиболее физически обоснованного критерия возникновения восходящего встречного лидерного разряда с наземного объекта. Не-

смотря на то, что используемый в вероятностном методе критерий (1) хорошо зарекомендовал себя при решении ряда проблем молниезащиты, дальнейшее развитие вероятностного метода возможно на основе новых подходов к моделированию возникновения восходящего лидерного разряда в поле грозового облака и нисходящего лидера молнии или анализа возможности использования в вероятностном методе имеющихся в настоящий момент современных моделей возникновения восходящего лидера [19-23].

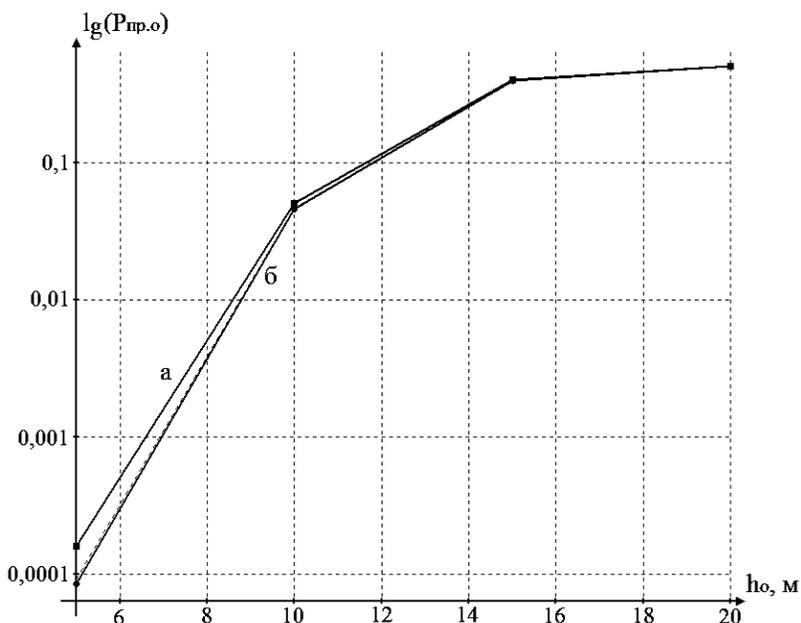


Рисунок 8 – Влияние формы объекта на показатели молниезащищенности: *a* – вероятность прорыва молнии на стержневой объект с тороидальной вершиной радиусом 1 м; *б* – вероятность прорыва молнии на стержневой объект с полусферической вершиной радиусом 8 мм

### Заключение

На основе численных экспериментов по расчету молниезащиты сосредоточенных объектов стержневым молниеотводом по вероятностной методике показано влияние на поражаемость сосредоточенного наземного объекта разрядом молнии не только его расположения относительно молниеотвода, но характеристик самого объекта и защищающего его молниеотвода (в первую очередь, формы радиуса кривизны вершины как самого объекта, так и защищающего его молниеотвода).

Полученные результаты открывают новые возможности для дальнейшего использования вероятностной методики оценки эффективности молниезащиты объектов, особенно при введении в нее физически обоснованного критерия

возникновения восходящего встречного лидерного разряда с наземных объектов. Перспективным представляется такой подход при определении молниезащищенности сооружений сложной конфигурации, которыми в большинстве случаев являются реальные промышленные и энергетические объекты и сооружения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

**Список литературы:** 1. Целебровский Ю. В. Актуальные вопросы молниезащиты объектов электроэнергетики // Первая Российская конференция по молниезащите, Новосибирск, 2007. 2. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций: СО – 153 – 34.21.122-2003. – М.: МЭИ, 2004. 3. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. – С.-Пб.: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. 4. IEC Standard 62305-1. Protection against lightning. – Part I: General principles. 2005. 5. C. Vouiquegneau A critical view on the lightning protection international standard // Journal of Electrostatics. – 65 (2007). – P. 395-399. 6. C.B. Moore, W. Rison, J. Mathis, G. Aulich Lightning rod improvements // J. Appl. Meteorology. – 39. – 2000. – PP. 593-609. 7. Темников А.Г., Черненский Л.Л., Орлов А.В., Герастенков Т.К., Белова О.С. Применение искусственных заряженных облаков для исследования молниезащиты сосредоточенных объектов на моделях // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – № 49. – 2011. – С. 151-170. 8. F.A.M. Rizk Analysis of Space Charge Generating Devices for Lightning Protection: Performance in Slow Varying Fields // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 25, No. 3. – July 2010. – PP. 1996-2006. 9. Калугина И. Е. Развитие вероятностной методики расчета молниезащиты линий СВН и УВН // Вестник МЭИ. – 2008. – № 1. – С. 79-83. 10. Калугина И. Е. Развитие вероятностной методики расчета молниезащищенности воздушных линий электропередачи // Электричество. – 2011. – № 11. – С. 25-30. 11. Никутин О.А., Дьяков А. Ф., Верещагин И. П. Анализ основных влияющих факторов в расчете вероятности поражения молнией наземных объектов в сборнике Теория и практика электрических разрядов в энергетике // Под ред. чл.-кор. РАН А.Ф. Дьякова ЮЦПК РП «Ожэнерготехнадзор». – Пятигорск, 1997. – 314 с. 12. Калугина И. Е., Гундарева С. В., Белоголовский А. А., Темников А. Г. Развитие вероятностной методики для оценки поражаемости молнией сосредоточенных объектов. // Вестник МЭИ. – № 2. – 2012. 13. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 223 с. 14. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 15. Ларионов В.П., Колещицкий Е.С., Шульгин В.Н. Расчет вероятности прорыва молнии сквозь тросовую защиту // Электричество. – № 5. – 1981. – С. 19-23. 16. V. Rakov. A Review of Triggered-Lightning Experiments // 30<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection, Cagliari, Italy, 2010. 17. Becerra, M., Cooray, V., Hartono, Z. Identification of lightning vulnerability points on complex grounded structures // Journal of Electrostatics. – Vol. 65. – 2007. – PP. 562-570. 18. F.A.M. Rizk Modeling of Lightning Exposure of Buildings and Massive Structures // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 24, No. 4. – October 2009. – PP. 1987-1998. 19. M. Becerra, V. Cooray. A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 21, No. 2. – April 2006. – PP. 897-908. 20. L. Delleria and E. Garbagnati. Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. Part 1: Description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 5, No. 4. – October 1990. – PP. 2009-2022. 21. N. Goelian, P. Lalande, A. Bondiou-Clergerie, G.-L. Bachiega, A. Gazzani, I. Gallimberti A simplified model for the simulation of positive-spark development in long air gaps // J. Phys. D: Appl. Phys. – Vol. 30. – 1997. – PP. 2441-2452. 22. Farouk A. M. Rizk. Modeling of Proximity Effect on Positive Leader Inception and Breakdown of Long Air Gaps // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 24, No. 4. – October 2009. – PP. 2311-2318. 23. Petrov, N. I., Waters, R. T. Determination of the striking distance of lightning to earthed structures // Proc. R. Soc. Lond. – A 450. – 1995. – PP. 589-601.

Поступила в редколлегию 27.03.2012.

**В.В.КНЯЗЕВ**, канд. техн. наук, зав.отд., НТУ «ХПИ»;  
**И.П.ЛЕСНОЙ**, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
**В.Н.ДНЬЩЕНКО**, зав. сектором, НТУ «ХПИ»

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ SPD ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ**

Сучасна елементна база електронних виробів не в змозі витримати вплив імпульсних перенапруг, рівень яких регламентується відповідними стандартами. Експлуатація таких виробів неможлива без застосування спеціальних пристроїв захисту, які названо «пристрій захисту від імпульсних перенапруг». Основні вимоги до таких пристроїв містяться у стандарті IEC 61643-11:2011. У статті описано методику випробувань та деякі отримані результати.

The modern element base of electronic wares can not survive influences of surge pulses, the level of that is regulated by corresponding standards. Exploitation of such wares is impossible without the special protective devices named «SPD». The basic requirements to these devices are contained in the standard of IEC 61643-11: 2011. Methodology of tests and their results are described in the article.

Современная элементная база электронных изделий не может выдержать воздействия импульсных перенапряжений, уровень которых регламентируется соответствующими стандартами. Эксплуатация таких изделий невозможна без специальных защитных устройств, называемых «устройство защиты от импульсных перенапряжений». Основные требования к этим устройствам содержатся в стандарте IEC 61643-11:2011. В статье описывается методика испытаний и их результаты.

### **Введение**

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств (ТС) является актуальной задачей, как для изготовителей продукции, так и для ее потребителей. Действующий в Украине Технический регламент по ЭМС [1] устанавливает определенные требования к уровню устойчивости ТС, в зависимости от их типа, области применения и имеющихся у ТС портов. Большинство ТС имеют порты электропитания. Обеспечение заданного уровня устойчивости порта электропитания к импульсным перенапряжениям может быть достигнуто за счет применения специальных устройств защиты от перенапряжений, которые называются SPD (surge protective device). Такое устройство содержит, по крайней мере, один нелинейный элемент, и обеспечивает ограничение напряжения и отведение тока импульсной помехи. SPD идентифицируются как одно- и двух- портовые. Одно-портовый SPD не вносит последовательного импеданса в цепь питания (параллельное включение), а двух-портовый имеет характерный последовательный импеданс (включается в разрыв цепи питания). SPD в зависимости от используемой элементной базы бывают трех типов:

- коммутирующие напряжение (voltage switching);
- ограничивающие напряжение (voltage limiting);
- комбинированные.

SPD коммутирующего типа имеют высокий импеданс в штатном режиме

питания, но мгновенно изменяют его до низких значений при появлении импульса перенапряжения. Это достигается за счет применения компонент «крупного» типа, таких как: воздушный разрядник, газовый разрядник, тиристор, симистор.

SPD ограничивающего типа имеют высокий импеданс в штатном режиме питания, но импеданс непрерывно уменьшается по мере увеличения тока и напряжения помехи. Типичными компонентами, применяемыми в таком типе SPD, являются варисторы, супрессоры и лавинные диоды, обобщенно называемые «ограничители».

На практике, часто применяются SPD комбинированного типа, сочетающие в себе компоненты обоих описанных выше типов, поскольку такие устройства обеспечивают лучшие параметры защиты.

По месту использования, SPD бывают двух типов: для наружного применения и использования внутри помещений.

По параметрам тока и напряжения, которые SPD может пропустить через себя, и уровню напряжения, которое попадает на защищаемый порт, устройства принято разделять на три типа в соответствии с классом испытаний: I, II и III.

Современные требования, которые предъявляются к устройствам защиты портов электропитания, регламентируются стандартом IEC 61643-11:2011 [2]. Основные положения этого стандарта в части обсуждаемого вопроса, описаны в работе [3]. В Европейском союзе действует стандарт EN IEC 61643-11:2002 [4], являющийся модифицированной версией предыдущей редакции упомянутого выше стандарта МЭК. В США действует стандарт [5], требования которого хоть и отличаются от требований стандарта [2] в части порядка проведения испытаний, но эти отличия нельзя считать существенными. Однако, рынок США предъявляет дополнительные по сравнению со стандартами [2, 4] требования к защитным возможностям SPD, связанные с ослаблением дестабилизирующего действия некоторых видов помех [6-8], которые могут появляться в сетях питания. Очевидно, что такой подход оправдан, поскольку не целесообразно под каждый вид помехи устанавливать отдельное защитное устройство. Это обстоятельство следует учитывать разработчикам и изготовителям, если в их планах есть освоение рынка США.

### **Современные требования к устройствам защиты**

Изложение современных требований к техническим характеристикам SPD, следует начать с определения терминов и обозначений, важных для понимания рассматриваемого вопроса, которые используются в цитируемом стандарте IEC 61643-11:2011 [2]. Рамки статьи не позволяют изложить все требования стандарта общий объем, которого составляет 98 страниц, поэтому, рассматривается лишь та часть стандарта, которые относятся к основным защитным характеристикам SPD, определяемым при проведении импульсных испытаний. При этих испытаниях осуществляется определение уровня напряжения защиты.

$I_{\text{imp}}$  – импульсный разрядный ток – пиковое значение тока (рекомендуе-

мая форма 10/350 мкс), протекающего через SPD, при испытаниях класса I;

$I_n$  – номинальный разрядный ток – пиковое значение тока формы 8/20 мкс, протекающего через SPD, при испытаниях класса II;

$I_{max}$  – максимальный разрядный ток, формы 8/20 мкс, который может пропустить через себя SPD, сохранив после этого нормальное функционирование. Значение  $I_{max}$  указывается изготовителем, и должно быть не менее значения  $I_n$ ;

$U_c$  – максимальное действующее значение напряжения, которое может быть непрерывно приложено к порту SPD;

$U_p$  – уровень напряжения защиты – максимальное напряжение, ожидаемое на выходе SPD, при испытаниях импульсными токами и напряжениями, заданных уровней и форм, в соответствии с классом испытаний. Значение  $U_p$  задается изготовителем путем выбора из стандартизованного ряда. Это значение должно быть больше всех измеренных ограниченных напряжений, полученных в процессе испытаний, при протекании тока с амплитудой, соотносящейся с  $I_n$  или  $I_{imp}$  для испытаний II или I класса, соответственно;

Измеренное ограниченное напряжение – максимальное значение напряжения, измеренного на выходах SPD, при подаче импульсов заданной формы и амплитуды;

$U_{max}$  – наибольшее измеренное напряжение в процессе испытаний импульсными напряжениями;

$U_{res}$  – остаточное напряжение – пиковое значение напряжения, которое появляется между клеммами SPD при протекании разрядного тока;

$U_{oc}$  – напряжение холостого хода генератора комбинированной волны;

$I_{cw}$  – ток короткого замыкания генератора комбинированной волны;

Комбинированная волна – волна напряжения  $U_{oc}$  (форма 1,2/50 мкс) заданного уровня, переходящая в волну тока  $I_{cw}$  (форма 8/20 мкс) с пиковым значением, соответствующим внутреннему сопротивлению генератора, равному 2 Ом.

Стандарт регламентирует три класса импульсных испытаний, которые отличаются амплитудно-временными параметрами испытательных напряжений и токов:

Класс I – отличительной особенностью испытаний этого класса является ток  $I_{imp}$ , который может достигать 25 кА. Требования к форме сформулированы таким образом, чтобы обеспечивался определенный уровень заряда, который протекает через SPD. На практике, используется импульс формы 10/350 мкс, удовлетворяющий всем требованиям стандарта [2].

Класс II – испытания проводятся с номинальным разрядным током  $I_n$ , напряжением 1,2/50 мкс и максимальным разрядным током  $I_{max}$ .

Класс III – испытания комбинированной волной с уровнем до 6 кВ /3 кА. Испытания проводятся по методике, регламентируемой стандартом ИЕС 61000-4-5:2005 [9].

Рассмотрим виды импульсных испытаний, включенные в раздел 8.3.3 стандарта [2]. Следует отметить, что в стандарте в разделе 8.1 содержатся указания о рекомендуемых параметрах испытательных импульсов и уровней до-

пустимых отклонений. Эта информация является полезной для лучшего понимания обсуждаемых требований.

Импульсный разрядный ток при дополнительных испытаниях класса I определяется его параметрами: пиковым значением  $I_{imp}$ , зарядом  $Q$  и условной энергией  $W/R$ . Условная энергия определяется как энергия, рассеянная на сопротивлении 1 Ом, при протекании тока с пиковым значением  $I_{imp}$ . Импульсный ток должен достичь значения  $I_{imp}$  не более чем за 50 мкс. Протекание заряда и рассеяние энергии должны завершиться в течении времени, не превышающим 5 мс. В табл. 1 (в стандарте табл. 6) представлены величины заряда и энергии, соответствующие указанным значениям  $I_{imp}$ . Типичной формой волны, при которой могут быть достигнуты параметры, соответствующие табл. 1, является униполярный импульс с фронтом 10 мкс, и длительностью на полуспаде 350 мкс.

Таблица 1 – Параметры испытания класса I

$I_{imp}$ , кА	$Q$ , Кл	$W/R$ , кДж/Ом
25	12,5	156
20	10	100
12,5	6,25	39
10	5	25
5	2,5	6,25
2	1	1
1	0,5	0,25

Примечание: Допустимые отклонения параметров установлены такими:

$I_{imp}$  :  $\pm 10\%$ ;  $Q$ :  $-10\%/+20\%$ ;  $W/R$ :  $-10\%/ +45\%$ .

Импульсные токи, используемые при испытаниях классов I и II для определения остаточного напряжения, имеют форму 8/20 мкс. Предпочтительный ряд значений номинальных разрядных токов  $I_n$  указан таким:

0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 5,0; 10,0; 15,0 и 20,0 кА.

Допустимые отклонения параметров волны тока (пиковое значение, время фронта и длительность полуволны)  $\pm 10\%$ .

Допускаются небольшие колебания или отклонения от установленного значения при условии, что амплитуда любого колебания не превышает 5 % от пикового значения. Любое изменение полярности после перехода тока через нуль не должно быть более чем 30 % от пикового значения.

С целью определения компонент «кроубарного» типа проводятся испытания классов I и II импульсным напряжением стандартной формы 1,2/50 мкс. Допуски на форму волны напряжения следующие:

- пиковое значение ...  $\pm 5\%$ ;
- длительность фронта ...  $\pm 30\%$ ;
- длительность полуволны  $\pm 20\%$ .

Колебания или отклонения от установленного значения могут произойти на пике импульса. Если частота таких колебаний свыше 500 кГц или длитель-

ность отклонения менее 1 мкс, с целью проведения измерений вычерчивается кривая значений, и тогда максимальная амплитуда этой кривой определит пиковое значение испытательного напряжения. Измерительные приборы должны иметь полосу частот не менее 25 МГц, и погрешность не более 3 %.

Испытание класса III осуществляются комбинированной волной. Стандартный импульс генератора комбинированной волны характеризуется выходным напряжением в условиях разомкнутой цепи и выходным током в условиях короткого замыкания. Напряжение разомкнутой цепи должно иметь время фронта 1,2 мкс и время полу периода 50 мкс. Ток короткого замыкания должен иметь время фронта 8 мкс и время полупериода 20 мкс. Допуски на напряжение  $U_{oc}$  в состоянии разомкнутой цепи следующие:

- пиковое значение ...  $\pm 5\%$ ;
- длительность фронта ...  $\pm 30\%$ ;
- длительность полуспада...  $\pm 20\%$ .

Предпочтительный ряд значений напряжений  $U_{oc}$  указан таким: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 10,0 и 20,0 кВ.

Детально требования к параметрам комбинированной волны и методики испытаний представлены в стандарте IEC 61000-4-5:2005 [9], гармонизированном в Украине.

Рассмотрим методики измерения ограниченного напряжения, являющегося основным параметром, характеризующим эффективность конкретного SPD. Испытания различных типов SPD с целью подтверждения уровня напряжения защиты ( $U_p$ ) должны быть проведены в соответствии с табл. 2 (табл. 7 стандарта [2]).

Таблица 2 – Испытания, выполняемые для определения предельного напряжения

Пункт по стандарту [2]	Класс I	Класс II	Класс III
8.3.3.1	X	X	–
8.3.3.2	X*	X*	–
8.3.3.3	–	–	X

Примечание: Знак «X» означает, что испытания проводятся.

\* – Применимо только для кроубарного и комбинированного типа SPD.

При испытаниях применяются следующие особые условия.

а) Все однопортовые SPD испытывают обесточенными.

б) Все двухпортовые SPD испытывают с подачей напряжения от источника с номинальным током не менее 5 А при напряжении  $U_c$ . Положительный импульс подается при  $(90 \pm 5)^\circ$ , а отрицательный импульс при  $(270 \pm 5)^\circ$  по отношению к фазе питающего напряжения.

с) Для однопортовых SPD, не имеющего отдельных выводов нагрузки, предельное напряжение измеряют на выводах, к которым прикладывают пере-напряжение. Для однопортовых SPD с отдельными выводами нагрузки, пре-

дельное напряжение измеряют на выводах длиной 150 мм.

d) Измерения ограниченного напряжения и определение  $U_{\max}$  осуществляются путем проведения испытаний, в соответствии с таблицей 2, применительно к классу испытаний SPD.

### **Определение остаточного напряжения**

*1. При протекании импульсов тока 8/20 мкс (п. 8.3.3.1 табл. 2).*

a) При испытаниях SPD по классу I, подают импульсы тока 8/20 мкс с пиковыми значениями, приблизительно равными 0,1; 0,2; 0,5 и 1,0 значений  $I_{\text{imp}}$ . Когда испытываются SPD по классу II, подают импульсы тока 8/20 мкс с пиковыми значениями, приблизительно равными 0,1; 0,2; 0,5 и 1,0 значений  $I_{\text{п}}$ . Если SPD содержит только компоненты, ограничивающие напряжение, это испытание проводится только при пиковом значении, равном  $I_{\text{imp}}$  или  $I_{\text{п}}$  для класса I или II, соответственно. В случае, когда изготовитель указывает  $I_{\text{max}}$ , дополнительные испытания током 8/20 должны быть проведены при пиковом значении равном  $I_{\text{max}}$  с измерением остаточного напряжения.

b) Одна серия импульсов положительной полярности и одна серия импульсов отрицательной полярности должны быть приложены к SPD.

c) Интервал между отдельными импульсами должен быть достаточным, чтобы образцы остыли до температуры окружающего воздуха.

d) Осциллограммы тока и напряжения должны регистрироваться для каждого импульса. По результатам должен быть построен график зависимости пиковых (абсолютных) значений остаточного напряжения  $U_{\text{res}}$  от величины тока в диапазоне до  $I_{\text{п}}$  или  $I_{\text{imp}}$ . На кривой должно быть достаточно точек, чтобы убедиться в отсутствии значительных отклонений.

e) По графику остаточного напряжения  $U_{\text{res}}$ , определяется наибольшее значение  $U_{\text{max}}$ , которое достигается в интервале токов  $I_{\text{п}}$  или  $I_{\text{max}}$  для класса II и  $I_{\text{imp}}$  для класса I.

*2. При подаче срезанной волны напряжения (п. 8.3.3.2 табл. 2).*

Применяется стандартное импульсное напряжение формой 1,2/50 мкс. Испытания начинаются при напряжении 6 кВ, создаваемых генератором на разомкнутой цепи.

a) К SPD прикладывают 10 импульсов каждой полярности: пять положительной и пять отрицательной.

b) Интервал между отдельными импульсами должен быть достаточным, чтобы образцы остыли до температуры окружающего воздуха.

c) Если не наблюдается среза напряжения на фронте каждого из 10 импульсов, то испытания a) и b) повторяются при более высоком напряжении на выходе генератора, вплоть до максимального 10 кВ. Напряжение поднимается с шагом, выбранным испытательной лабораторией, до тех пор, пока при прикладывании всех импульсов не появится разряд.

d) Напряжение на SPD должно регистрироваться осциллографом.

e) Измеренное ограниченное напряжение и  $U_{\text{max}}$  есть величина макси-

мального срезанного напряжения, зарегистрированного при проведении этих испытаний.

### 3. При подаче комбинированной волны (п. 8.3.3.3 табл. 2).

При проведении этих испытаний используется генератор комбинированной волны и устройство связи-развязки, требования к которым детально описаны в стандарте [9]. Процедура испытаний такова:

а) Интервал между отдельными импульсами должен быть достаточным, чтобы образцы остыли до температуры окружающего воздуха.

б) Выходное напряжение генератора устанавливается равным 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 величины  $U_{oc}$ , указанной изготовителем SPD. Если SPD содержит только компоненты, ограничивающие напряжение, эти испытания проводят только при напряжении, равном  $U_{oc}$ .

с) С установками генератора по п. б) к SPD прикладывают по четыре разряда каждой амплитуды: два положительной полярности и два отрицательной полярности.

д) Для каждого импульса должны быть сняты осциллограммы тока, поданного к SPD генератором, и напряжения на выходе SPD.

е) Измеренное ограниченное напряжение и  $U_{max}$  равно максимальному напряжению, зарегистрированному при проведении этих испытаний. Это может быть срезанное напряжение или остаточное напряжение в зависимости от конструкции SPD.

## Критерии соответствия

1. В результате испытаний не должны регистрироваться или наблюдаться пробои и воспламенения SPD.

2. Величины измеренного ограниченного напряжения  $U_{max}$ , полученные при испытаниях по разделу 8.3.3, не должны превышать значения  $U_p$ , указанного изготовителем.

В связи с этим, следует указать предпочтительные значения уровня напряжения защиты  $U_p$  в соответствии со стандартом [2]:

0,08; 0,09; 0,10; 0,12; 0,15; 0,22; 0,33; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90;  
1,00; 1,20; 1,50; 1,80; 2,00; 2,50; 3,00; 4,00; 5,00; 6,00; 8,00 и 10,00 кВ.

3. Нет видимых повреждений, которые появились в процессе испытаний.

## Методика испытаний

В качестве примера, рассмотрим результаты испытаний конкретного устройства защиты, общий вид которого представлен на рис. 1. Это устройство трехфазное, однопортовое, имеет 10 ступеней защиты. Изготовитель указал, что устройство относится к классам II и III. Следовательно, испытания должны быть проведены по пунктам 8.3.3.1 и 8.3.3.3 стандарта IEC 61643-11:2011. В рамках данной статьи ограничимся рассмотрением результатов испытаний только по первому из указанных пунктов, то есть по классу II. Эффективность SPD оценивается по параметрам остаточного напряжения на портах устройст-

ва при подаче импульсов тока формой 8/20 мкс с уровнем силы тока в диапазоне от 1 кА до 20 кА. При испытаниях, на каждом из четырех уровней из указанного интервала силы тока подавалось по 3 импульса как положительной, так и отрицательной полярностей.

При испытаниях, напряжение генератора УИГ-1 подавалось непосредственно на порт SPD, который в момент воздействия не был подключен с сети питания. Сочетание пар портов SPD выбиралось таким образом, чтобы испытать все имеющиеся варианты степеней защиты: фаза-земля, фаза-нейтраль, нейтраль-земля.

Измерение уровня остаточного напряжения и его формы осуществлено с помощью высоковольтного пробника ИИН-К1 с оптической линией передачи информации. Регистрация сигнала с пробника осуществлялась с помощью цифрового запоминающего осциллографа, имеющего полосу частот не менее 100 МГц.

Измерение параметров тока, осуществлялось с помощью низкоомных шунтов (сопротивление менее 0,05 Ом). Шунт ШК-50 с кабельной линией связи используется для измерений токов на выходе установки УИГ-1 при коротком замыкании. Шунт ШО-4 с оптической линией передачи информации используется для измерения тока, протекающего через порт SPD.



Рисунок 1 – Испытываемое устройство защиты

Типовая осциллограмма импульса тока положительной полярности на выходе установки УИГ-1 представлена на рис. 2.

Общий вид испытательного поля показан на рис. 3.

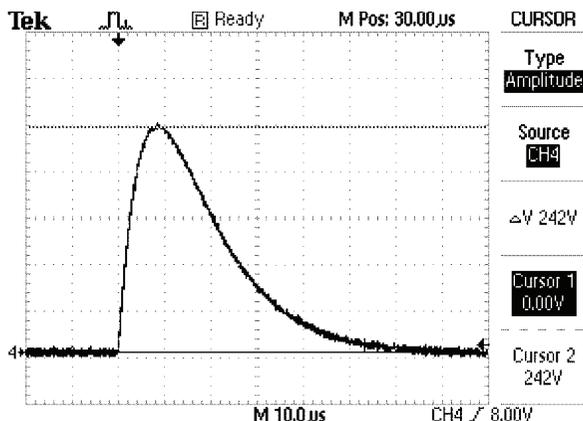


Рисунок 2 – Типовая осциллограмма импульса тока формы 8/20 мкс

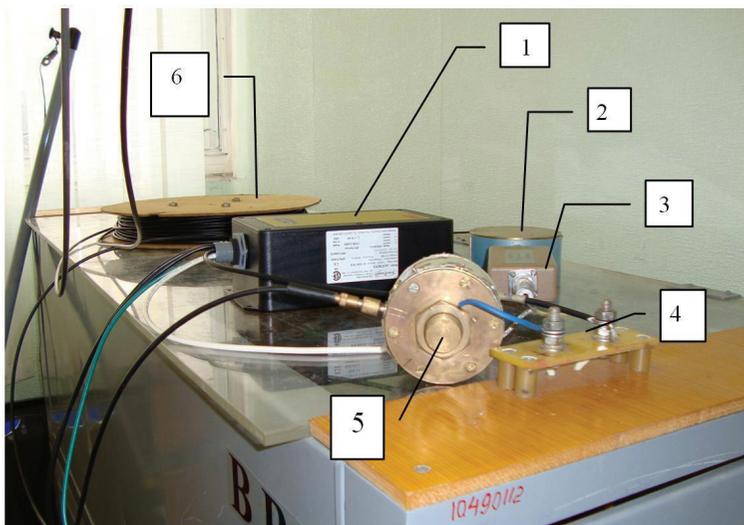


Рисунок 3 – Общий вид испытательного поля установки УИГ-1:

- 1 – Испытываемое изделие; 2 – Измеритель напряжений оптический ИИН-К1;  
 3 – Высоковольтный делитель 1:150; 4 – Высоковольтный вывод установки УИГ-1; 5 – Шунт оптический ШО-4; 6 – Бухта оптического кабеля к ИИН-К1

### Результаты испытаний

Осциллограмма остаточного напряжения на портах устройств защиты, при подаче импульсов тока с амплитудой в диапазоне от 1 кА до 20 кА, имеет вид, представленный на рисунке 4. На осциллограмме по каналу 1 регистрировался ток, протекающий через SPD. Коэффициент ( $k_1$ ) калировки измерительного тракта равен 9,6 А/мВ. Амплитуда тока ( $I_m$ ) определяется по форму-

ле:  $I_m = k_1 \cdot U_1$ . По каналу 2 регистрировалось остаточное напряжение  $U_{res}$ . На осциллограмме курсор установлен так, что значения  $\Delta V = U_2$  [mВ], указанные в середине правой колонки, относятся к сигналу  $U_{res}$ . Коэффициент ( $k_2$ ) калибровки измерительного тракта равен  $k_2 = 8,785$  В/мВ. Амплитуда напряжения ( $U_{res}$ ) определяется по формуле:  $U_{res} = k_2 \cdot U_2$

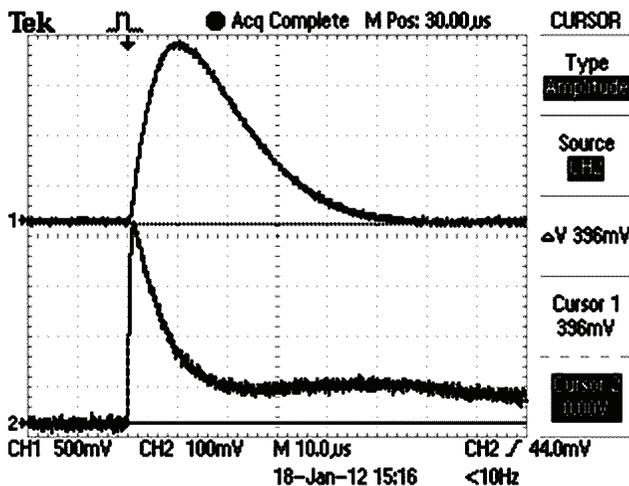


Рисунок 4 – Осциллограмма остаточного напряжения и тока, протекающего через SPD через пару А-Г при положительной полярности тока силой 17,07 кА

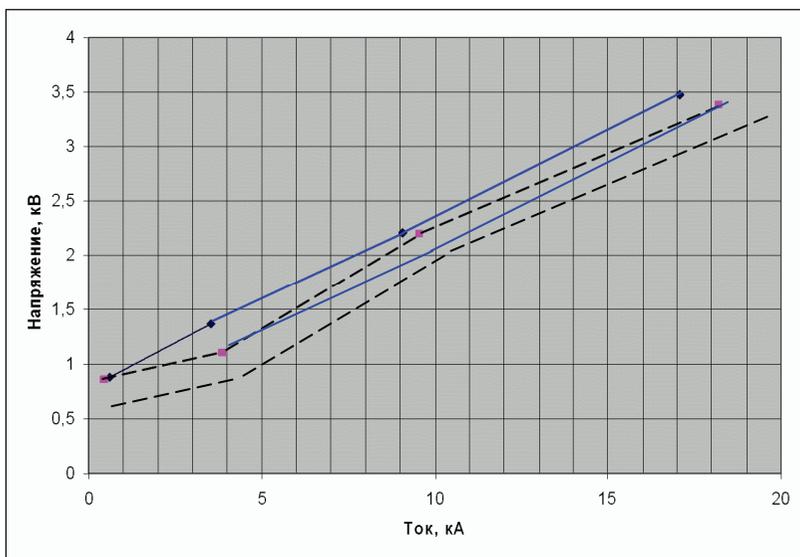


Рисунок 5 – Зависимость уровня остаточного напряжения от силы тока

Для каждого уровня силы тока из трех вариантов определялся вариант с максимальным значением остаточного напряжения и эти значения принимались за результат. Формы остаточного напряжения для различных вариантов сочетания пар портов испытываемого устройства защиты не имеют принципиальных отличий и схожи с осциллограммой, представленной на рис. 4.

По результатам испытаний построен график зависимости величины остаточного напряжения от амплитуды тока, протекающего через SPD, представленный на рис. 5. Сплошная кривая относится к импульсам положительной полярности, пунктирная – отрицательной.

По результатам испытаний защитное устройство подтвердило свою классификацию по II классу. Значение уровня напряжения защиты  $U_p$  определяется как максимальное в диапазоне от 0,1 до 1,0 значений  $I_n$ . Изготовитель установил  $I_n$  равным 10 кА. Следовательно, на основании результатов испытаний, значение уровня напряжения защиты  $U_p = 2,5$  кВ.

### **Выводы:**

Требования к техническим параметрам устройств защиты от перенапряжений регламентируются стандартом IEC 61643-11:2011.

Испытания устройств защиты на соответствие требованиям указанного стандарта в части воздействия импульсных перенапряжений реализованы.

По результатам испытаний защитное устройство от перенапряжения в сети электропитания, которое было испытано воздействием импульсных токов формой 8/20 мкс, подтвердило свою классификацию по II классу со значением уровня напряжения защиты  $U_p$  равным 2,5 кВ.

**Список литературы:** 1. Технічний регламент з електромагнітної сумісності обладнання, затверджений Постановою Кабінету Міністрів України від 29 липня 2009 р. №785. 2. IEC 61643-11:2011 Low voltage surge protective devices – Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems – Requirements and test methods. 3. Князев В.В. Технічні вимоги до пристроїв захисту від сплесків напруги портів електроживлення технічних засобів // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2012. – № 2. 4. EN IEC 61643-11:2002 Low voltage surge protective devices – Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems – Requirements and test methods. (IEC 61643-1:1998, Mod.). 5. UL 1449: 2006 3-rd Edition. Surge Protection Device. 6. IEEE Std. C62.41.1-2002 IEEE Guide on the surge environment in low-voltage (1000 V and less) AC power circuits. 7. IEEE Std. C62.41.2-2002 IEEE Recommended practice on characterizations of surge in low-voltage (1000 V and less) AC power circuits. 8. IEEE Std. C62.45-2002 IEEE Recommended practice on surge testing for equipment connected to low-voltage (1000 V and less) AC power circuits. 9. IEC 61000-4-5:2005 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measure techniques – Surge immunity test.

*Поступила в редколлегию 04.04.2012.*

**В.В.КНЯЗЕВ**, канд. техн. наук, зав.отд., НТУ «ХПИ»;  
**П.Н.МЕЛЬНИКОВ**, науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
**А.Ю.ЧЕРНУХИН**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРИМЕРНОЙ КОРОНЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ НА МОЛНИЕПРИЕМНИКАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ФОРМАМИ ВЕРШИН И ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ**

У роботі представлені результати експериментального дослідження процесу виникнення стримерних спалахів зі стержнів, що мають різні характеристики. Визначені значення критичної напруженості електричного поля, при якій виникають стримерні спалахи. Встановлено, що мінімальне значення критичної напруженості електричного поля характерне для квадратного стержня із стороною 12 мм. Такий стержень рекомендується в якості зразкового при проведенні атестації блискавкоприймачів.

The results of experimental research of the process of streamer flashes origin from the bars having different characteristics are presented in this paper. The values of critical tension of electric-field, there are streamer flashes at that, are certain. It is set that the minimum value of critical tension of electric-field is characteristic for a square bar with a side 12 mm. Such bar is recommended as a standard one during realization of air terminal attestation.

В работе представлены результаты экспериментального исследования процесса возникновения стримерных вспышек со стержней, имеющих различные характеристики. Определены значения критической напряженности электрического поля, при которой возникают стримерные вспышки. Установлено, что минимальное значение критической напряженности электрического поля характерно для квадратного стержня со стороной 12 мм. Такой стержень рекомендуется в качестве образцового при проведении аттестации молниеприемников.

### **Введение**

Основой систем молниезащиты зданий и сооружений от прямых ударов молнии являются металлические конструкции в виде стержневых, тросовых и сеточных молниеприемников. В Украине требования к таким системам регламентируются стандартом ДСТУ Б В.2.5-38:2008 [1], который введен в действие с 01.01.2009, в замен руководящего документа РД 34.21.122-87 [2]. К сожалению, стандарт [1] не отражает в полной мере современные достижения в этой области, изложенные в группе стандартов Международной электротехнической комиссии IEC 62305:2011 [3-6].

В отличие от упомянутых выше систем, которые условно можно назвать «пассивными», в мире предпринимаются настойчивые попытки создания «активных» устройств, обеспечивающих существенное увеличение размеров зоны защиты, по сравнению с зоной защиты классического стержневого молниеприемника Франклина (СМ). Принцип действия таких устройств основан на концепции ускоренного создания стримера, встречного к каналу молнии. Эти устройства названы «Early streamer emission air terminals» (ESE молниеприемники). Правила проектирования систем молниезащиты, в которых использу-

ются ESE молниеприемники, регламентируются стандартом Франции [7]. Этот стандарт имплементирован рядом Европейских стран, в том числе Испанией, Болгарией, Латвией. Основные элементы учета защитных свойств ESE молниеприемников включены в соответствующую инструкцию в Казахстане [8]. Декларируемый радиус защиты ESE молниеприемников прямо пропорционален времени опережения, и определяется по следующей формуле [7]:

$$R = \sqrt{h(2D - h) + \Delta L(2D + \Delta L)},$$

где  $R$  – радиус зоны защиты, м;  $h$  – высота вершины молниеприемника,  $h > 5$  м;  $D$  – расстояние поражения (20, 45, 60 м);  $\Delta L = V \cdot \Delta T$ ;  $\Delta T$  – время опережения, мкс;  $V = 1$  м/мкс – средняя скорость встречного стримера.

Методика определения времени опережения регламентируется стандартом Франции NF C 17-102: 1995 [7]. Поскольку этот стандарт не является легко доступным, с основными положениями методики можно познакомиться в работах [9, 10].

Однако, эта методика не получила всеобщего признания, поскольку, физические принципы и численные значения величин, положенные в основу стандарта Франции, вызывают критику со стороны значительной части ученых, работающих в области высоких напряжений. Основные возражения, которые отмечают противники стандарта, следующие:

- нет научного обоснования экстраполяции результатов лабораторных испытаний на реальные условия;
- скорость восходящего лидера по мере удлинения канала увеличивается от 0,12 м/мкс до 0,65 м/мкс, но не достигает значения 1 м/мкс;
- скорость стримера может превышать значение 1 м/мкс, однако, стример не может прорасти на десятки метров.
- не приведены аргументы в пользу выбранного значения стандартизованной длительности фронта импульса 650 мкс;
- начальные коронные процессы практически не влияют на значение разрядного напряжения в длинных воздушных промежутках;
- нет научно организованных натуральных испытаний, подтверждающих правоту сторонников ESE.

Не смотря на сопротивление научной общественности, ESE молниеприемники широко используются во всем мире при создании систем молниезащиты. Безусловно, на сегодняшний день, это, в значительной мере, обуславливается стремлением людей к новизне, и желанием иметь красивое, пусть и дорогое, устройство, а не частокол из металлических стержней и тросов. В результате, возникло очевидное противоречие. Поэтому, научное обоснование физических основ действия ESE молниеприемников или доказательство их малой эффективности, является актуальной задачей.

Следует отметить, что разработчики стандарта [7] внимательно отслеживают новые идеи, которые могут повысить достоверность оценки защитных свойств ESE молниеприемников. Например, в работе [10], была обоснована необходимость оценки не только среднего значения времени опережения, но и дисперсии кривой распределения. В новой редакции стандарта [7], вышедшей

в 2011 г., уже введена такая норма. Также, в новой редакции стандарта указывается, что время опережения, которое может приниматься в расчетах, не должно превышать 60 мкс.

Авторы настоящей статьи предлагают при классификации молниеприемников дополнительно использовать значения следующих параметров тока стримерной короны:

- критическое значение напряженности постоянного электрического поля ( $E_{кр}$ ) при котором возникают стримерные вспышки;
- пиковое значение тока стримерной короны ( $I_k$ ), который стекает с молниеприемника, при размещении его на штатной высоте в электростатическом поле грозового облака при выбранном значении напряженности поля;
- величина заряда ( $Q_m$ ), который стекает с молниеприемника, при подаче на него импульсного напряжения, характеристики которого зависят от усредненных параметров прорастающего лидера молнии.

Предлагается отыскать закономерности между значениями этих параметров и напряжением пробоя длинного воздушного промежутка.

В рамках данной статьи, представлены результаты исследования влияния формы стержня, его поперечного размера и геометрии вершины на критическое значение напряженности постоянного электрического поля  $E_{кр}$  при которой возникает стримерная вспышка.

### **Методика исследований**

При приближении грозового облака, за счет сопутствующего электрического поля, на молниеприемнике индуцируется электрический заряд, что обуславливает повышение напряженности поля на конце молниеприемника и появление коронного разряда. При некотором значении напряженности электрического поля на фоне «тихой» короны, ток которой составляет не более сотен микроампер, возникают стримерные вспышки, которые характеризуются током в десятки миллиампер. Только стримерная вспышка при определенных условиях может преобразоваться в лидер. Поэтому, определение критического значения напряженности электрического поля, при котором возникают стримерные вспышки, является важным параметром исследуемой задачи. Моделирование этого процесса осуществлено на высоковольтном испытательном стенде ВВС-1.2 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ».

Исследования проведены на стержневых молниеприемниках, размещавшихся между двумя параллельными металлическими плоскостями. Размеры плоскостей: нижняя – 4,02 x 6,56 м, верхняя – 3,63 x 5,22 м. Схема испытательного комплекса при проведении измерений тока короны приведена на рис. 1.

В процессе испытаний нижняя плоскость была заземлена. Верхняя плоскость потенциальная – на нее подавалось высокое напряжение (ВН) обеих полярностей от ПВУ-200. Расстояние между плоскостями (H) 2,20 м. Величина воздушного промежутка между вершиной стержня и верхней, потенциальной, плоскостью 1,30 м.

Стержневые молниеприемники имели одинаковую длину 0,75 м, и размещались на изолирующей подставке. Ток в цепи регистрировался при помощи резистивного шунта ( $R_{ш}$ ) 50 Ом и электронного осциллографа TEKTRONIX TDS 1012 (ЭО), соединенных коаксиальным радиочастотным кабелем типа РК-50 длиной 30 м.

Исследования проведены на десяти вариантах стержней, отличающихся формой сечения, размерами и формой вершины. Варьируемые характеристики стержневых молниеприемников представлены в табл. 1.

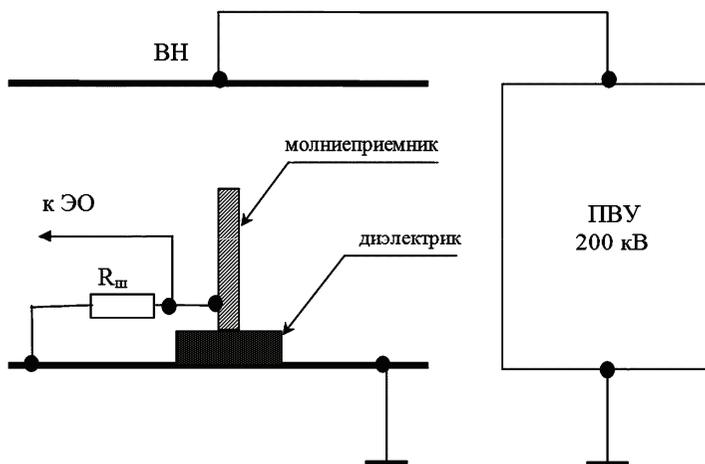


Рисунок 1 – Схема испытательного комплекса

Таблица 1 – Характеристики стержневых молниеприемников

№ стержня	Наименование	Материал	Размеры поперечного сечения, мм	Вершина стержня
1	квадрат	сталь	12	плоская
2	квадрат	сталь	16	плоская
3	шестигранник	сталь	12	плоская
4	шестигранник	сталь	19	плоская
5	круг	сталь	Ø12	плоская
6	круг	сталь	Ø22	плоская
7	круг	Д16	Ø10	плоская
8	круг	Д16	Ø20	плоская
9	круг	Д16	Ø10	конус
10	круг	Д16	Ø20	конус

При плавном поднятии напряжения фиксировался момент появления импульса стримерной вспышки на экране осциллографа. Чувствительность изме-

рительной системы позволяла регистрировать сигнал, уровень которого превышает 5 мВ, что соответствует величине силы тока более 0,1 мА. В качестве примеров, на рисунках 2 и 3 представлены осциллограммы характерных всплесков тока короны (стримерных вспышек) для молниеприемника №5 круглого сечения диаметром 12 мм, с плоской вершиной. Корона возникла при напряжении 92 кВ, амплитуда единичного всплеска составляет 46,5 мА.

На рис. 2, а представлен единственный стример, а на рис. 2, б осциллограмма последовательности стримеров в течении 1 с при критическом значении напряжения. На рис. 3, а представлена осциллограмма сканирования за 1 с при напряжении 100 кВ, и на рис. 3, б осциллограмма сканирования за 1 с при напряжении 140 кВ.

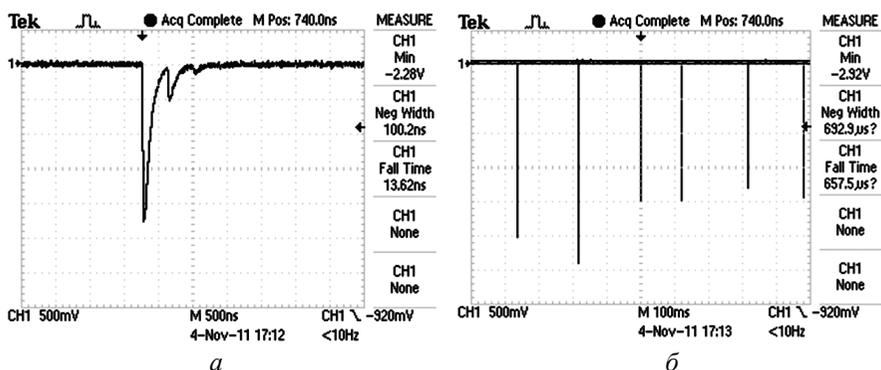


Рисунок 2 – Характерные осциллограммы стримерных вспышек

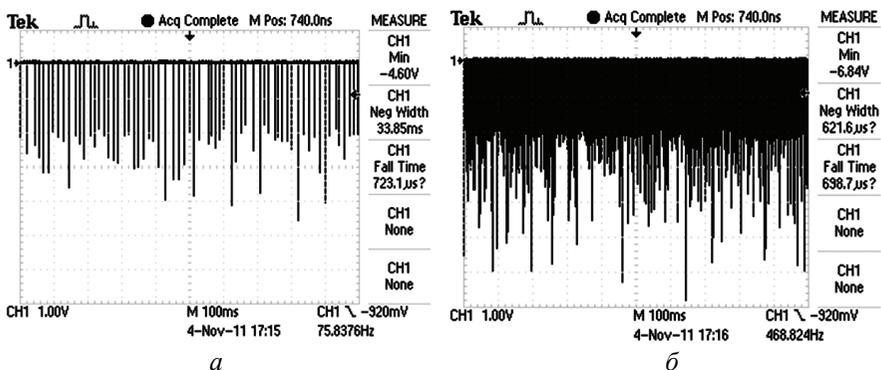


Рисунок 3 – Осциллограммы развившейся короны

Аналогичные осциллограммы были получены для всех образцов молниеприемников, указанных в табл. 1. Результаты измерений для варианта отрицательной полярности потенциального полеобразующего электрода представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты измерения характеристик стационарной короны

№ стержня	Напряжение на потенциальном электроде, $U_{кр}$ , кВ	Амплитуда силы тока единичного всплеска, мА	Падение напряжения на шунте, В	$E_{кр}$ , кВ/м
1	78	<b>26,8</b>	1,34	<b>35,45</b>
2	84	27,2	1,36	38,18
3	80	28	1,4	36,36
4	96	30,4	1,52	43,64
5	92	45,6	2,28	41,82
6	122	52,8	2,64	55,45
7	80	38,4	1,92	36,36
8	112	48,4	2,42	50,91
9	20	1,72	0,086	9,09
10	24	3,12	0,156	10,91

Примечание:  $E_{кр} = U_{кр} / H$

Анализ представленных в таблице 2 результатов показывает, что для стержней с конусообразной вершиной возникновение стримерных вспышек наблюдается при напряженности электрического поля около 10 кВ/м. При этом, сила тока составляет единицы миллиампер. Известно [11], что перейти в лидерную стадию потенциально способны только те стримеры, сила тока которых достигает десятков миллиампер. Безусловно, по мере увеличения напряженности электрического поля стримерные вспышки, возникающие с образцов 9 и 10, смогут достигнуть требуемых значений силы тока. Однако, как было показано в работе [10], такие молниеприемники имеют весьма размытую гистограмму времени опережения. Напротив, для образцов 1-8, имеющих плоскую вершину, за счет развитой линии образования короны, начальные стримерные вспышки удовлетворяют указанному выше условию, и могут с меньшей дисперсией преобразовываться лидер. Из всех исследованных образцов минимальное значение напряженности критического электрического поля (35,45 кВ/м) соответствует образцу № 1. Именно такой вариант стержневого молниеприемника рекомендован в работе [12] в качестве стандартного образца при проведении испытаний по стандарту Франции [1]. В указанной работе [12] рассмотрена математическая модель процесса, реализованного в рамках настоящих экспериментальных исследований. Показано, что среди стержней, с поперечным сечением в форме круга, квадрата, шестиугольника и восьмиугольника, наибольшее значение напряженности электрического поля на поверхности имеет стержень квадратного сечения. Причем, чем меньше размер сечения, тем выше напряженность. Однако, с учетом требований к элементам молниезащиты, сечение молниеприемника должно быть более 140 мм<sup>2</sup>. Всем указанным требованиям удовлетворяет образец №1, что полностью подтверждено описанными экспериментальными исследованиями.

## **Выводы:**

1. Начальные коронные процессы, связанные с условиями образования стримерных вспышек, которые способны перейти в лидерную фазу, могут влиять на значение разрядного напряжения в длинных воздушных промежутках.

2. Экспериментально подтверждено, что в качестве образцового молниеприемника следует признать стальной стержень квадратного сечения размером  $12 \times 12 \text{ мм}^2$ , с плоской вершиной. Длина стержня может быть выбрана любой. Однако, исходя из реальных возможностей большинства высоковольтных лабораторий мира, целесообразно ее принять равной 1,0 м.

3. Авторы приглашают всех заинтересованных в комплексном решении поставленных задач к сотрудничеству, путем обмена данными, согласования планов расчетных и экспериментальных исследований. Контакт можно установить по адресу электронной почты: [knyaz2@i.ua](mailto:knyaz2@i.ua).

**Список литературы:** 1. ДСТУ Б В.2.5-38:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд (IEC 62305:2006 NEC). Введ. 01.01.2009. – К.: Мінергіобуд України, 2008. – 63 с. 2. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 56 с. 3. IEC 62305-1:2011. Protection against lightning. Part 1. General principles. – Geneva, Switzerland: Publication IEC, 2011. – 68 p. 4. IEC 62305-2:2011. Protection against lightning. Part 2. Risk management. – Geneva, Switzerland: Publication IEC, 2011. – 110 p. 5. IEC 62305-3:2011. Protection against lightning. Part 3. Physical damage to structures and life hazard. – Geneva, Switzerland: Publication IEC, 2011. – 154 p. 6. IEC 62305-4:2006. Protection against lightning. Part 4. Electrical and electronic systems within structures. – Geneva, Switzerland: Publication IEC, 2006. – 101 p. 7. NF C 17-102: 1995. Lightning protection. Protection of structures and open areas against lightning using early streamer emission air terminals. 8. СН РК 2.04-29-2005. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – Астана: 2006. – 32 с. 9. Князев В.В., Кравченко В.И., Лесной И.П. Тестирование активных молниеприемников // Вестник НТУ «ХПИ». – 2003. – Вып. 1. – С. 80-88. 10. Князев В.В., Кравченко В.И., Лесной И.П. и др. Результаты исследования параметров активных молниеприемников и рассеивателей // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. выпуск «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2008. – Вып. 21. – С. 78-87. 11. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с. 12. Князев В.В., Горюшкин А.Э., Скобляков А.Ю. Результаты численного моделирования распределения напряженности электрического поля по поверхности стержневого молниеприемника // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. выпуск «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2011. – Вып. 49. – С. 77-85.

*Поступила в редколлегию 07.03.2012.*

**В.В.КНЯЗЕВ**, канд. техн. наук, зав. отд., НТУ«ХПИ»;  
**Ю.С.НЕМЧЕНКО**, гл. метролог, НТУ «ХПИ»;  
**И.П.ЛЕСНОЙ**, зав. лаб., НТУ «ХПИ»;  
**С.Б.СОМХИЕВ**, вед. инж., НТУ «ХПИ»;  
**С.Ю.СКОБЛИКОВ**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## **ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОГО АВИАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА НЕВОСПРИИМЧИВОСТЬ К НЕСТАНДАРНЫМ ПРОВАЛАМ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ГНПН-А**

Описано конструкцію і результати атестації генератора ГНПН-А, призначеного для випробувань технічних засобів на несприйнятливості до нестандартних провалів напруги електромережі постійного струму згідно з чинними в Україні стандартами. Генератор формує циклограми випробувальної напруги п'яти видів.

The design and results of the qualification of the generator named «GNPN-A», intended for test the technical facilities for immunity to nonstandard voltage dips on d.c. input power port in accordance with acting in Ukraine normative documents, are described. The apparatus generates the mission profile of the test voltage of the five kinds.

Описаны конструкции и результаты аттестации генератора ГНПН-А, предназначенного для испытаний технических средств на устойчивость к нестандартным провалам напряжения электросети постоянного тока в соответствии с действующими в Украине стандартами. Генератор формирует циклограммы испытательного напряжения пяти видов.

В настоящее время обязательным видом испытаний бортового авиационного оборудования (БАО) есть проверка невосприимчивости к нарушениям качества электропитания постоянным током 27 В и 14 В, которые выражаются в динамических изменениях этого напряжения (выбросы, провалы и кратковременные прерывания) – ДИН. Виды и амплитудно-временные параметры (АВП) ДИН регламентируются разделом 16 международного стандарта на испытания БАО КТ-160D [1].

Все виды ДИН можно разделить на две большие группы:

- стандартные ДИН;
- нестандартные ДИН.

Стандартные ДИН применяются при испытаниях не только БАО, но и других видов технических средств (ТС) и представляют собой ДИН прямоугольной формы [2]. Для их генерирования в испытательной лаборатории НИПКИ «Молния» применяется созданный ранее генератор У-ДИН-ПТ [3], который генерирует все виды стандартных ДИН, а также их количество и временные и амплитудные параметры.

Нестандартные ДИН характерны только для летательных аппаратов (самолетов и вертолетов) и представляют собой ДИН непрямоугольной формы.

Таких ДИН в разделе 16 КТ-160D всего 4 вида для напряжения электропитания БАО 27 В и один – для напряжения электропитания БАО 14 В. Все виды нестандартных ДИН приведены на рис. 1-4, а их АВП – в табл. 1 и 2.

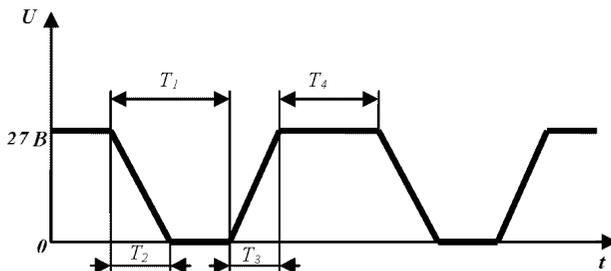


Рисунок 1 – Циклограмма провалов напряжения питания БАО в режимах КПЦС-1 и КПЦС-2

Таблица 1 – Режим КПЦС-1

Параметр	Норма
$T_1$ (мс)	$1000 \pm 100$
$T_2$ (мс)	$20 \pm 2$
$T_3$ (мс)	$5 \pm 0,5$
$T_4$ (с)	$1 \pm 0,1$

Таблица 2 – Режим КПЦС-2

Параметр	Норма
$T_1$ (мс)	$1000 \pm 100$
$T_2$ (мс)	$50 \pm 5$
$T_3$ (мс)	$20 \pm 2$
$T_4$ (с)	$1 \pm 0,1$

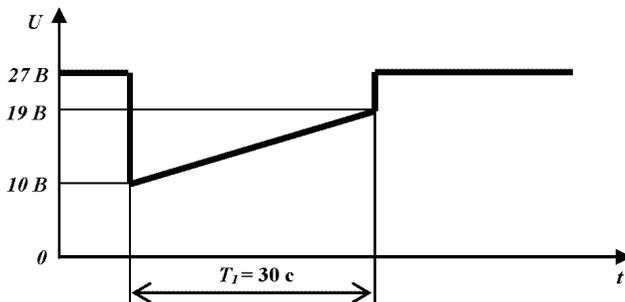


Рисунок 2 – Циклограмма провалов напряжения питания БАО в режиме ПНЗД

Именно для генерирования такого вида ДИН и создан испытательный генератор ГНПН-А, предназначенный для лабораторных испытаний ТС на не-



Таблица 3 – Характеристики генератора ГНПН-А

Наименование характеристики	Размерность	Величина
Напряжение питания генератора ГНПН-А	В	220
	Гц	50
Потребляемая мощность, не более	кВ А	5
Время готовности генератора к использованию, не более	мин	15
Время непрерывной работы, не более	час	8
Габаритные размеры генератора, не более	мм	350x230x125
Масса генератора, не более	кг	4,5

Генератор ГНПН-А собран в металлическом корпусе с габаритами 350x230x125 мм. На передней панели генератора ГНПН-А, рис. 6, расположены следующие органы управления и контроля:

- клавиша СЕТЬ с подсветкой служит для подачи напряжения питания 220 В 50 Гц на генератор ГНПН-А и для его отключения после окончания работы;
- переключатель ВИД ПРОВАЛА служит для установления вида провала и имеет пять положений:
  - КПЦС-1 – кратковременные прерывания электропитания для цифровых схем – 1 режим;
  - КПЦС-2 – кратковременные прерывания электропитания для цифровых схем – 2 режим;
  - ПНЗД – пониженное напряжение при запуске двигателя;
  - ПННР-27 – кратковременное пониженное напряжение при ненормальных режимах сети электропитания 27 В;
  - ПННР-14 – кратковременное пониженное напряжение при ненормальных режимах сети электропитания 14 В.
- кнопка СТАРТ служит для включения режимов работы генератора;
- кнопка СБРОС служит для возвращения генератора в начальное состояние;
- лампочка ГОТОВ при горении показывает, что генератор готов к генерированию видов провалов;
- лампочка ИНД. ЦИКЛА при горении сигнализирует об отработке заданной циклограммы провалов.

На задней панели генератора ГНПН-А (рис. 7) расположены следующие органы управления и контроля:

- разъем СЕТЬ служит для подключения к генератору ГНПН-А сетевого кабеля;
- 8 А и 4 А – предохранители;
- клемма  $\perp$  служит для подключения генератора ГНПН-А к контуру за-

земления;

- клеммы + 27 (14) В и КОРПУС служат для подключения ТС к генератору.

Расположение элементов внутри корпуса генератора ГНПН-А приведено на рис. 8.



Рисунок 6 – Передняя панель генератора ГНПН-А

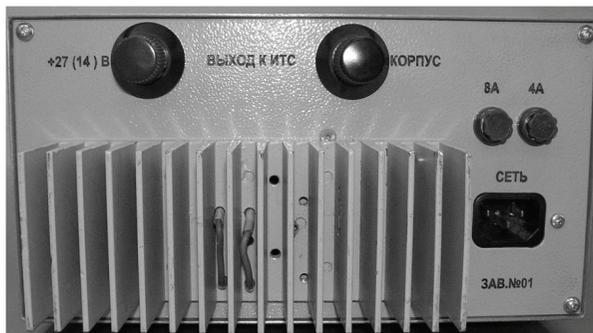


Рисунок 7 – Задняя панель генератора ГНПН-А

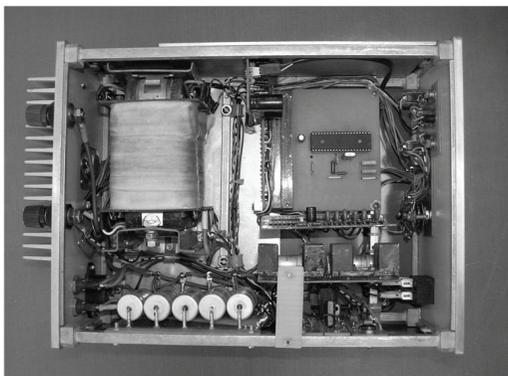


Рисунок 8 – Расположение элементов внутри корпуса генератора ГНПН-А

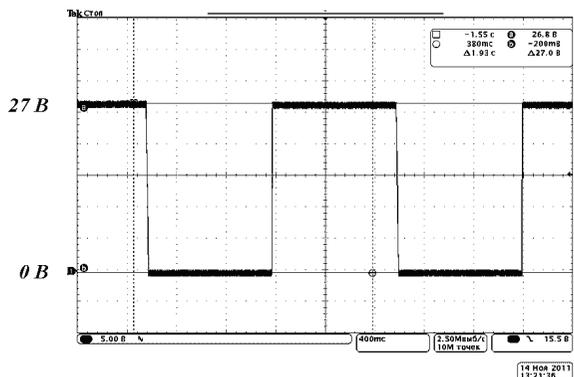


Рисунок 9 – Типовая циклограмма выходного напряжения генератора в режимах КПЦС-1 и КПЦС-2

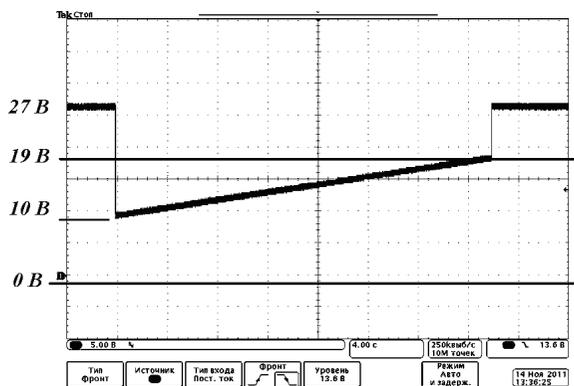


Рисунок 10 – Типовая циклограмма выходного напряжения генератора в режиме ПНЗД

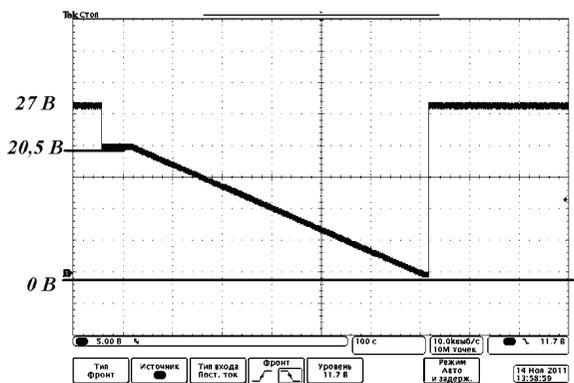


Рисунок 11 – Типовая циклограмма выходного напряжения генератора в режиме ПННР-27

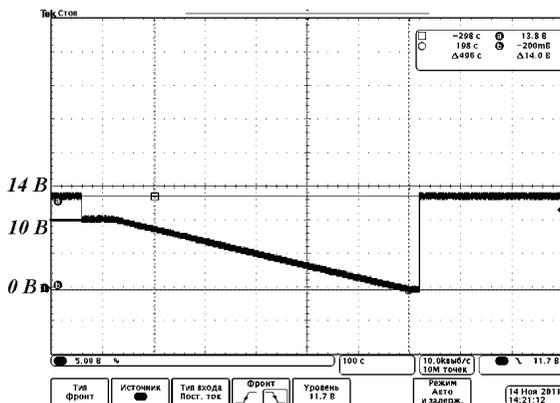


Рисунок 12 – Типовая циклограмма выходного напряжения генератора в режиме ПННР-14

На рис. 9-12 показаны результаты измерения выходного напряжения на выходе генератора ГНПН-А в разных режимах работы.

Генератор ГНПН-А прошел государственную аттестацию и успешно применяется в Испытательной лаборатории НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» для проведения различного рода испытаний ТС, включая сертификационные, на невосприимчивость к нестандартным провалам напряжения электропитания постоянного тока (по р. 16 КТ-160D).

**Список литературы:** 1. КТ-160D Квалификационные требования. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. (Внешние воздействующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 16.0 Электропитание. 2. IEC 61000-4-29:2000 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-11: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations on d.c. input power port immunity test. 3. Программируемый таймер – коммутатор напряжения питания постоянным током ПТК-ПТ. Руководство по эксплуатации. ПТК-ПТ.000.000.000 РЭ.

*Поступила в редколлегию 11.04.2012.*

**В.В.КНЯЗЕВ**, канд. техн. наук, зав.отд., НТУ «ХПИ»;  
**А.Ю.СКОБЛИКОВ**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## **МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ КОРПУСОВ – ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ**

У статті наведено методики перевірки ступеню адекватності розрахункових моделей за оцінки екрануючих властивостей корпусів, які розроблено авторами. Перевірка здійснена шляхом порівняння з результатами вимірювання параметрів електричного та магнітного полів в середині металевої оболонки при дії імпульсних електричного і магнітного полів, та струму, який тече скрізь оболонку.

To the article methodologies of verification of degree of adequacy are driven worked out by the authors of calculation models as evaluated by screening properties of shell. Verification comes true by comparing to the results of measuring of the parameters electric and magnetic fields into a metallic shell at influence impulsive electric and magnetic fields, and also current leak on a shell.

В статье приведены методики проверки степени адекватности разработанных авторами расчетных моделей по оценке экранирующих свойств корпусов. Проверка осуществляется путем сравнения с результатами измерения параметров электрического и магнитного полей внутри металлической оболочки при воздействии импульсных электрического и магнитного полей, а также тока, протекающего по оболочке

### **Введение**

Наиболее надежным и универсальным способом защиты электронного оборудования от дестабилизирующего действия электромагнитных полей является экранирование. В качестве электромагнитного экрана целесообразно использовать корпус самого оборудования и корпус объекта ракетно-космической техники (РКТ), внутри которого размещается оборудование. Из общих законов электродинамики известно [1], что степень ослабления электромагнитного поля однородной металлической оболочкой тем выше, чем больше толщина стенки экрана и чем больше значения удельной электропроводности и магнитной проницаемости материала, из которого изготовлен корпус. При всей простоте этой закономерности, на практике возникает необходимость оценить экранирующие свойства реального корпуса при действии электромагнитного поля с заданными амплитудно-временными параметрами. Решение такой задачи расчетным путем с учетом всех особенностей корпуса оказывается достаточно сложным. В настоящее время известны частные случаи, для которых получены аналитические решения [2-5]. Решение задачи экранирования численными методами анонсируется некоторыми пакетами прикладных программ, которые реализовываются на рынке. Однако, возможности таких программ весьма ограничены, особенно для корпусов, у которых толщина стенок составляет несколько миллиметров, а габаритные размеры превышают десятки метров [6]. Задача еще более усложняется при рассмотрении импульсных процессов, сопровождающих молниевый разряд. Авторами раз-

работаны математические модели процессов взаимодействия импульсных электрического и магнитного полей, сопровождающих молниевый разряд, с реальными корпусами РКТ [4, 5, 7]. В данной статье излагается методика проверки адекватности этих моделей.

### **Постановка задачи**

Разработанные математические модели позволяют рассчитать амплитудно-временные параметры электрического и магнитного полей внутри реального корпуса, с учетом имеющихся структурных неоднородностей его стенок, при воздействии поражающих факторов, сопровождающих молниевый разряд. Объективным доказательством правильности математической модели является совпадение полученных с ее помощью результатов с результатами экспериментальных исследований. Искомыми являются характеристики электрического и магнитного полей внутри корпуса. Проверка адекватности моделей осуществляется путем сравнения расчетных значений этих характеристик, со значениями, полученными экспериментальным методом.

Основные задачи методики проверки адекватности заключаются в следующем:

- определить требования к макету корпуса РКТ, который позволит провести измерения электрического и магнитного полей внутри него;
- согласовать размеры макета с размерами испытательного поля стенда ВВС-1.2;
- определить значения параметров электрического, магнитного полей и тока, характерных для процесса молниевых разрядов;
- определить требования к средствам измерения напряженностей электрического и магнитного полей, с учетом ожидаемых характеристик полей внутри макета;
- определить точки измерения и значимые компоненты векторов полей с учетом конечных размеров соответствующих преобразователей и особенностей их конструкций;
- оптимизировать очередность выполнения измерений для минимизации общего времени, затраченного на испытания.

### **Основные элементы методики**

Исходя их размеров испытательного поля стенда ВВС-1.2, для проведения экспериментов изготовлен макет корпуса – экрана, в виде цилиндрической оболочки, характерной для объектов РКТ. Основные технические характеристики макета указаны в табл. 1. Материал корпуса – сплав алюминия АМц. На боковой поверхности оболочка имеет отверстие, закрываемое сменными накладками. С торцов цилиндрическая оболочка закрыта крышками, одна из которых – съемная.

Для подтверждения влияния формы и количества отверстий на уровень полей, проникающих внутрь макета корпуса, используются накладки. Накладки изготовлены из того же материала и такой же толщины, что и макет корпуса. Размеры накладок таковы:

А) Заглушка для обеспечения однородности стенки корпуса 410x460 мм;

- В) Квадратное отверстие 180x180 мм;
- С) Узкое прямоугольное отверстие (щель) 340x20 мм;
- Д) Множественные отверстия: 4 отверстия диаметром 100 мм, расстояние между центрами отверстий 150 мм.

Таблица 1 – Основные технические характеристики макета корпуса

Параметр	Единица	Значение
Диаметр	м	0,9
Длина	м	3,0
Толщина стенки	м	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Материал	–	АМц
Удельная электрическая проводимость	См/м	$2,9 \cdot 10^7$
Относительная магнитная проницаемость	–	1,0
Отверстие в боковой поверхности в форме прямоугольника с размерами $h$ )	м x м	0,35x0,40

Введена следующая идентификация вариантов использования макета корпуса:

- «МК-0» – корпус без накладки (отверстие 350x400 мм).
- «МК-1» – корпус с накладкой А (однородный);
- «МК-2» – корпус с накладкой В;
- «МК-3» – корпус с накладкой С;
- «МК-4» – корпус с накладкой D.

Подтверждение устойчивости бортового оборудования к действию сторонних электромагнитных помех, является обязательным требованием при сертификации летательного аппарата. Амплитудно-временные параметры электромагнитных помех, сопровождающих молниевый разряд, определены в межгосударственном стандарте ГОСТ 30585-98 [8]. Основные значения этих параметров представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Основные параметры ЭМП молниевый разряда [8]

Вид помехи	Форма волны	Граничная частота, кГц	Длина волны, м	Максимальный уровень
Е - поле	0,1/10 мс	7,2	41782	300 кВ/м
Н - поле	2/50 мкс	778	386	300 А/м
I - ток	2/50 мкс	778	386	200 кА

Определение требований к средствам измерения (СИ) напряженностей электрического и магнитного полей, осуществлено с учетом ожидаемых характеристик полей внутри макета. Предельные требуемые параметры СИ по уровню поля и верхней границы полосы частот определены с учетом данных табл. 2. Нижняя граница частотного диапазона и требуемая чувствительность СИ определены на основании результатов расчетной оценки, произведенной с учетом реально достижимых значений параметров помех, которые создает

стенд ВВС-1.2.

Для проведения экспериментов созданы три вида измерителей полей:

- измеритель внешнего и внутреннего электрических полей типа ИНЭП К-1 (рис. 1);
- измеритель внутреннего магнитного поля типа ИНМП К-1А (рис. 2);
- измеритель внешнего магнитного поля типа ИНМП К-1Б, внешний вид которого аналогичен ИНМП К-1А.

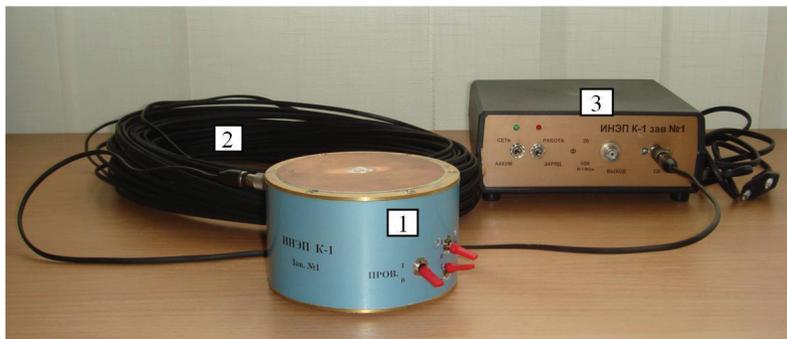


Рисунок 1 – Общий вид измерителя ИНЭП К-1:

- 1 – блок емкостного измерительного преобразователя (БЕИП);  
2 – оптический кабель (ОК); 3 – блок фотоприемника (БФП)

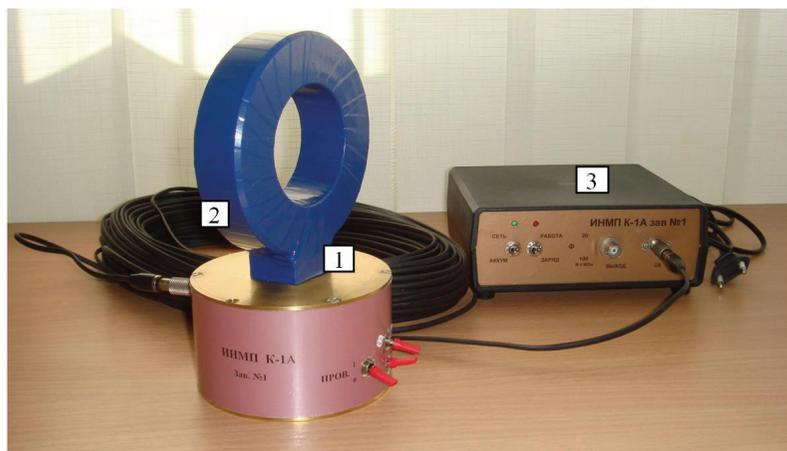


Рисунок 2 – Общий вид измерителя ИНМП К-1А (ИНМП К-1Б):

- 1 – блок индукционного измерительного преобразователя (БИИП);  
2 – оптический кабель (ОК); 3 – блок фотоприемника (БФП)

Все измерители содержат измерительный преобразователь (ИП) того или иного вида, блок преобразования электрического сигнала в световой (БПС),

гибкий оптический кабель (ОК) длиной 50 м и фотоприемник (БФП), преобразовывающий световой сигнал в напряжение, регистрируемое осциллографом. Подробное описание электрических схем СИ и результатов их государственной метрологической аттестации представлено в работе [9]. Требование гальванической развязки, реализованной с помощью ОК, является обязательным при измерении пространственной структуры полей, тем более в условиях мощных помех. При измерениях электрических и магнитных полей в экспериментальной установке ИП размещаются в заданной точке измерения, БФП вместе с регистратором размещаются в измерительной кабине, а связь между ними осуществляется через ОК. При метрологической аттестации определены времена переходных характеристик (ПХ) измерителей и коэффициенты преобразования измерителей. На рис. 3 представлен пример осциллограммы, получаемой при метрологической аттестации.

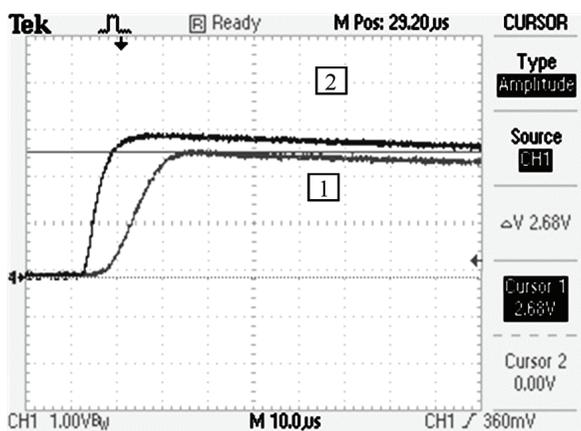


Рисунок 3 – Типовая осциллограмма фронта импульса напряжения положительной полярности на выходе измерителя ИНЭП К-1А на верхнем уровне 2 диапазона – кривая 1 и аттестационного импульса Е поля эталона РЭМП – кривая 2

Результаты метрологической аттестации всех вышеперечисленных выше видов измерителей приведены в табл. 3-5. Блоки измерительных преобразователей имеют диаметр 105 мм, что вносит ограничения на выбор возможных точек измерения. Габариты преобразователя в значительной мере обусловлены размерами используемого аккумулятора, емкость которого должна быть достаточной для продолжительности работы не менее 8 часов.

### Программа исследований

1. Измерения электрического и магнитного полей внутри пустого корпуса проводятся в следующих вариантах:

1.1. Измерения полей в пустом электрически однородном корпусе (накладка А) в трех точках для каждого вида испытательных импульсов;

1.2. Измерения полей в пустом электрически неоднородном корпусе (накладка В) в трех точках для каждого вида испытательных импульсов;

1.3. Измерения полей в пустом электрически неоднородном корпусе (накладка С) в трех точках для каждого вида испытательных импульсов;

Таблица 3 – Метрологические характеристики ИНЭП К-1

Метрологические характеристики	Требования по ТЗ		Получено при аттестации		
	Величина	Погрешность	Величина	Относит. погрешность	Абсолютная погрешность
Коэффициент преобразования, $K_{пр}$ , В/(В/м), Первый диапазон Второй диапазон	не устанавливается	10 %	$0,40 \times 10^{-3}$ $9,10 \times 10^{-6}$	3,94 % 3,94 %	$0,02 \times 10^{-3}$ $0,36 \times 10^{-6}$
Время нарастания ПХ, $T_n^{ПХ}$ с, не более Первый диапазон Второй диапазон	$10^{-6}$	5 %	$0,625 \times 10^{-6}$ $0,023 \times 10^{-6}$	1,0 % 1,0 %	$6,3 \times 10^{-9}$ $0,2 \times 10^{-9}$
Время спада ПХ, $T_c^{ПХ}$ , с, не менее Первый диапазон Второй диапазон	0,1	5 %	$129,00 \times 10^{-3}$ $133,00 \times 10^{-3}$	1,1 % 1,1 %	$1,41 \times 10^{-3}$ $1,46 \times 10^{-3}$

1.4. Измерения полей в пустом электрически неоднородном корпусе с множественными отверстиями (накладка D) в трех точках для каждого вида испытательных импульсов;

1.5. Измерения полей в пустом корпусе (накладка Е с установленным разъемом) в трех точках для каждого вида испытательных импульсов.

2. Измерение электрического и магнитного полей внутри электрически однородного корпуса с установленным макетом оборудования в тех же точках пространства, что и по пункту 1. В качестве макета оборудования используются корпуса электронных приборов в количестве 3 штук общим объемом от  $120 \text{ дм}^3$  до  $160 \text{ дм}^3$ .

Макеты приборов гальванически соединены между собой.

3 Измерение полей внутри макета корпуса при протекании по нему импульса тока осуществляются для всех вариантов макета МК0 – МК5.

При исследованиях используются следующие испытательные импульсы:

– импульс электрического поля формы  $0,1/10$  мс с пиковым значением  $300 \text{ кВ/м}$ ;

Таблица 4 – Метрологические характеристики ИНМП К-1А

Метрологические характеристики	Требования по ТЗ		Получено при аттестации		
	Величина	Погрешность	Величина	Относительная погрешность	Абсолютная погрешность
Коэффициент преобразования, $K_{пр}$ , В/(А/м) для положительной полярности: Первый диапазон Второй диапазон для отрицательной полярности: Первый диапазон Второй диапазон	не устанавливается	10%	$560 \times 10^{-3}$ $63,2 \times 10^{-3}$	2,45 %	$13,7 \times 10^{-3}$ $1,5 \times 10^{-3}$
			$520 \times 10^{-3}$ $56,1 \times 10^{-3}$		$12,7 \times 10^{-3}$ $1,4 \times 10^{-3}$
Время нарастания ПХ, $T_n^{ПХ}$ с, не более	$20 \times 10^{-6}$	5%	$11,3 \times 10^{-6}$	1,0 %	$0,1 \times 10^{-6}$
Время спада ПХ $T_c^{ПХ}$ , с, не менее Первый диапазон Второй диапазон	$5 \times 10^{-3}$	5%	$11,0 \times 10^{-3}$ $40,0 \times 10^{-3}$	1,1 %	$0,12 \times 10^{-3}$ $0,44 \times 10^{-3}$

Таблица 5 – Метрологические характеристики ИНМП К-1Б

Метрологические характеристики	Требования по НД		Получено при аттестации		
	Величина	Отклонение	Величина	Относ. погрешность	Абсолютная погрешность
Коэффициент преобразования, $K_{пр}$ , В/(А/м) Первый диапазон Второй диапазон	не устанавливается	10%	$57,8 \times 10^{-3}$ $3,40 \times 10^{-3}$	2,43 %	$1,4 \times 10^{-3}$ $0,08 \times 10^{-3}$
Время нарастания ПХ, $T_n^{ПХ}$ , с, не более	$300 \times 10^{-9}$	5%	$156,9 \times 10^{-9}$	1,1 %	$1,7 \times 10^{-9}$
Время спада ПХ, $T_c^{ПХ}$ с, не менее	$0,5 \times 10^{-3}$	5%	$1,30 \times 10^{-3}$	1,0 %	$0,01 \times 10^{-3}$

- импульс магнитного поля формы  $2/50$  мкс с пиковым значением 300 А/м;
- импульс тока формы  $2/50$  мкс с пиковым значением 2000 А.

В процессе исследований подлежат определению значения следующих параметров:

- амплитудно-временные параметры импульсных электрических полей, проникающих внутрь макетов (в 3 точках каждого вида МК) при внешних электрических полях формы  $0,1/10$  мс;
- амплитудно-временные параметры импульсных магнитных полей, проникающих внутрь макетов (в 3 точках каждого вида МК), при воздействии внешних магнитных полей формы  $2/50$  мкс.
- амплитудно-временные параметры электрических и магнитных полей, проникающих внутрь макетов (в 3 точках каждого вида МК), при протекании импульсного тока по корпусу МК.

Последовательность проведения испытаний определяется из соображений удобства и минимизации времени на их проведение.

### **Методические рекомендации**

Измерения формы и амплитудно-временных параметров импульсных электрических и магнитных полей внутри исследуемого корпуса производится в трех контрольных точках КТ1, КТ2 и КТ3 (рис. 4). Координаты этих точек устанавливаются перед началом испытаний. В качестве исходного варианта предлагается такое расположение:

- КТ1 – на оси макета напротив центра отверстия (без на);
- КТ2 – вдоль оси, проходящей через центр отверстия на расстоянии 0,25 м от точки КТ1;
- КТ3 – вдоль оси макета в точке его геометрического центра (0,225 м от точки КТ1).

В каждой точке производится измерение в трех ортогональных положениях измерительных преобразователей СИТ. Компонента поля, которая регистрируется СИТ, показана на рис. 18 и 19 для случая электрического и магнитного полей, соответственно.

Измерения амплитудно-временных параметров импульсных электрических и магнитных полей внутри исследуемого корпуса производится поочередно для всех типов исследуемых корпусов (МК0-МК5). Установка измерительных преобразователей СИ производится на координатное устройство (КУ) МК, которое предварительно устанавливается и фиксируется внутри МК таким образом, чтобы вертикальная ось КУ совпала с направлением вектора  $E$ , проходящего через геометрический центр накладки или была параллельна вектору  $H$ . Общий вид КУ представлен на рис. 5.

Для изменения ориентации измерительного преобразователя необходимо снять накладку с МК и через открывшееся отверстие при помощи штатных устройств на КУ произвести пространственное изменение измерительного преобразователя относительно векторов  $E$  или  $H$ . Присоединенный к измери-

тельному преобразователю гибкий волоконный световод пропустить через торцевую крышку МК и далее через специальный ввод завести в измерительную кабину, присоединить его к фотоприемнику, а фотоприемник кабелем к входу осциллографа. Настроить СИ импульсных электрических и магнитных полей по методике, изложенной в Руководствах по эксплуатации этих СИ.

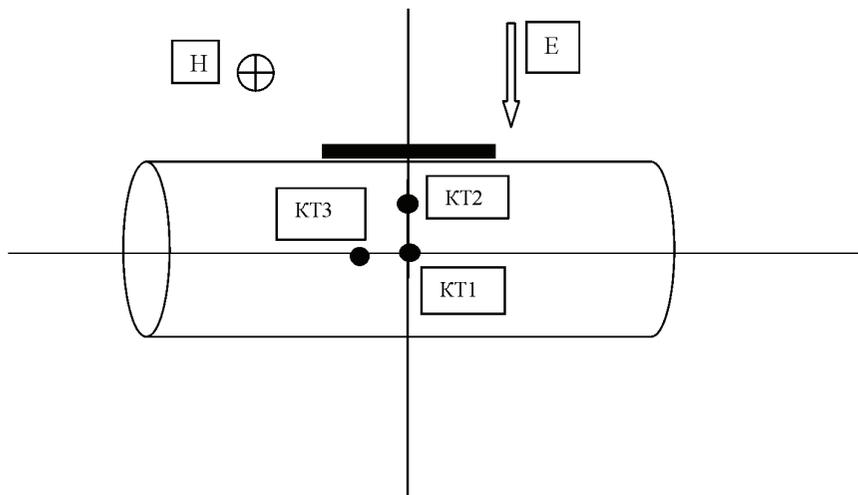


Рисунок 4 – Расположение контрольных точек измерения электрических и магнитных полей внутри МК



Рисунок 5 – Общий вид координатного устройства

Установить МК на подставку и всю эту конструкцию разместить в центре рабочего объема испытательного стенда ВВС-1.2 таким образом, чтобы центральная ось МК совпала с продольной осью рабочего объема. Подставка для установки (ПУ) представляет собой диэлектрическую конструкцию (рис. 6) и предназначена для установки МК на высоте 1 м в рабочем объеме.



Рисунок 6 – Общий вид подставки для установки МК

Для контроля внешних воздействующих электрических и магнитных полей установить измерительные преобразователи ИНЭП или ИНМП в пределах рабочего объема испытательной установки, но вдали от МК. От них провести в измерительную кабину, присоединить к соответствующим фотоприемникам и осциллографу. После выполнения всех вышеперечисленных подготовительных работ можно приступать к проведению экспериментальных работ.

#### **Методика измерения экранирующих свойств МК при воздействии импульсных электрических полей**

В качестве примера, рассмотрим методику измерения электрического поля  $E_i$  внутри макета корпуса при внешнем воздействии электрического поля  $E_0$ .

Схема измерений, показана на рис. 7. Последовательность действий такова:

1. Включить и прогреть все задействованные в испытаниях приборы.
2. Установить измерительный преобразователь ИНЭП-К1 в контрольную точку КТ1 в одной из ориентаций и включить его.
3. На осциллографе ЭО-1 установить:
  - режим работы ждущий
  - развертка 2мс/дел.
  - чувствительность - в зависимости от прогнозируемой амплитуды сигнала.

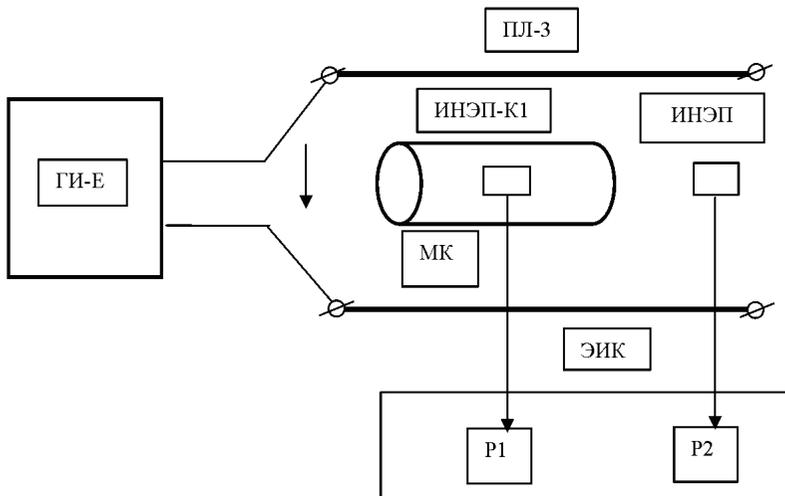


Рисунок 7 – Схема проведения исследований экранирующих свойств МК при нагружении внешним импульсным электрическим полем:

ГИ-Е – генератор импульсов электрического поля формы 0,1/10 мс;  
 ПЛ-3 – полеобразующая система 3 м; МК – испытуемый макет корпуса;  
 Е – вектор напряженности испытательного электрического поля;  
 ИНЭП-К1 – измеритель внутренних электрических полей;  
 ИНЭП – измеритель напряженности внешних электрических полей;  
 ЭИК – экранированная измерительная камера;  
 P1, P2 – регистраторы (осциллографы)

4. На осциллографе ЭО-2 установить:
  - режим работы ждуший
  - развертка 2мс/дел.
  - чувствительность - в зависимости от прогнозируемой амплитуды сигнала.
5. На пульте управления генератора ГИ-Е установить зарядное напряжение, соответствующее напряженности электрического поля 300 кВ/м.
6. Нажатием кнопки «ПОДЖИГ» произвести разряд ГИ-Е. Зафиксировать осциллограмму импульса внешнего электрического поля на экране осциллографа ЭО-2.
7. Из осциллограммы определить амплитуду и временные параметры импульса напряженности внешнего электрического поля по следующей процедуре:
  - амплитуду напряженности электрического поля определить по формуле :

$$E_{\max} = \frac{U_{\max}^E}{K_{II}^E} \quad (1)$$

где  $U_{\max}$  – импульс напряжения с выхода ИНЭП;  
 $K_{II}^E$  – коэффициент преобразования ИНЭП, берется из свидетельства о его метрологической аттестации (СМА)

- временные параметры униполярных импульсов  $E$  поля определить по методике, изложенной в международном стандарте IEC 60060-1:1989, которая заключается в раздельном определении длительности фронта импульса  $T_f$  и длительности полуспада  $T_c$ .
- а) Длительность фронта импульса определяется как интервал времени между уровнями  $0,9U_m(I_m)$  и  $0,1 U_m(I_m)$ , умноженное на коэффициент 1,25.
- б) Длительность полуспада импульсов определяется как интервал времени между условным началом импульса и уровнем  $0,5 U_m(I_m)$  и спаде импульса.
- 8. Если амплитудно-временные параметры импульсов напряженности внешнего электрического поля соответствуют требованиям к его амплитуде и форме, то можно начинать измерения внутренних электрических полей.
- 9. Проведя несколько контрольных разрядов ГИ-Е и изменяя при этом чувствительность осциллографа ЭО-1 получить осциллограмму напряжения с выхода ИНЭП-К1 с амплитудой не менее половины экрана. При помощи горизонтальных курсоров ЭО-1 измерить амплитуду этого импульса напряжения  $U_{\max}^i$  а результат измерения занести в таблицу.
- 10. Для набора статистических данных с целью подтверждения стабильности амплитуды напряжения с выхода ИНЭП-К1 произвести еще 4 разряда генератора ГИ-Е, результаты измерения также, занести в таблицу.
- 11. По методике, изложенной выше, поочередно изменить ориентацию измерительного преобразователя, и повторить измерения.
- 12. Повторить эксперименты в других контрольных точках КТ2 и КТ3.

Аналогичный порядок действий при проведении измерений параметров магнитного поля внутри макета корпуса. Отличие заключается в схеме формирования воздействующего магнитного поля и использовании соответствующих измерителей типа ИНМП.

Исследования экранирующих свойств корпуса при протекании по нему тока имеют некоторые отличия. При этом, выход генератора тока подключается непосредственно к макету РКТ, а измерение проводится только Н - поля. Проникновением электрического поля в этом случае можно пренебречь.

### **Выводы:**

1. Представлена методика проверки адекватности математических моделей защитных свойств корпусов - электромагнитных экранов.
2. Методика реализована при проведении исследований в рамках контракта с ГП «КБ «Южное».

3. Исследования подтвердили адекватность разработанных математических моделей процессов проникновения полей в корпус РКТ при действии электрического, магнитного полей и токов, сопровождающих молниевый разряд.
4. Результаты исследований опубликованы в работах [11, 12]. Погрешность расчетной методики не превышает 20%.

**Список литературы:** 1. *Каден Г.* Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи : пер. с нем. *В.М. Лаврова.* – М.-Л.: ГосЭнергоИздат, 1957. – 327 с. 2. *Васильев В.В., Коленский Л.Л., Медведев Ю.А.* Проводящие оболочки в импульсном электромагнитном поле. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 200 с. 3. *Кравченко В.И.* и др. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с. 4. *Князев В.В.* Аналитическое решение задачи проникновения электрического поля через эллиптическое отверстие в проводящей плоскости // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сб. научных трудов. Тем. вып. «Энергетика и преобразовательная техника». – Х.: НТУ «ХПИ», 2004. – № 35. – С. 71-82. 5. *Князев В.В.* Аналитическое решение задачи проникновения высокочастотного магнитного поля через эллиптическое отверстие в проводящей плоскости // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сб. научных трудов. Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – № 37. – С. 19-29. 6. *Байда Е.И.* Электротехника и электромеханика. – Х.: НТУ «ХПИ» 2009. – № 3. – С. 45-49. 7. *Скобликов А.Ю.* Методика оценки влияния структурных неоднородностей электромагнитного экрана на его защитные свойства / *А.Ю. Скобликов* // «Электротехника и электромеханика» Научно-практический журнал. – Х.: НТУ «ХПИ», 2010. – № 4. – С. 44-48. 8. ГОСТ 30585-98 Совместимость технических средств электромагнитная. Стойкость к воздействию грозových разрядов. Технические требования и методы испытаний. 9. *Князев В.В., Немченко Ю.С., Лесной И.П.* и др. Использование эталона РЭМП в работах по исследованию импульсных экранирующих свойств металлических экранов // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сб. научных трудов. Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Х.: НТУ «ХПИ», 2011. – № 16. – С. 92-110. 10. IEC 60060-1:1989 High-voltage test techniques. – Part 1: General definitions and test requirements. 11. *Скобликов А.Ю.* Анализ точности гибридного метода при расчете электрического поля внутри неоднородного электромагнитного экрана // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тем. вип. «Техніка і електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХПІ», 2011. – № 16. – С. 162-172. 12. *Скобликов А.Ю.* Результаты моделирования процесса проникновения электрического поля внутрь структурно-неоднородного электромагнитного экрана // «Электротехника и электромеханика». Научно-практический журнал. – Х.: НТУ «ХПИ», 2011. – № 4. – С. 66-71.

*Поступила в редколлегию 11.04.2012.*

*Д.Г.КОЛИУШКО*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
*Г.М.КОЛИУШКО*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
*А.А.ПЕТКОВ*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИКОСНОВЕНИЯ НА ОБОРУДОВАНИИ ПОДСТАНЦИЙ С УЧЕТОМ СТАТИСТИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА РАСЧЕТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА**

У роботі запропонований імовірнісний підхід до визначення напруги дотику з урахуванням статистичного характеру розрахунків опору ґрунту. Представлено методику оцінки можливості появи значення напруги дотику вище припустимої величини із заданою ймовірністю.

In work the probabilistic approach to definition of touch voltage taking into account a statistical character of ground resistance calculations is offered. The method of an occurrence possibility estimation of touch voltage value above allowable value with the specified probability is presented.

В работе предложен вероятностный подход к определению контактного напряжения с учетом статистического характера расчетов сопротивления почвы. Представлена методика оценки возможности появления значения контактного напряжения выше допустимой величины с заданной вероятностью.

**Постановка проблемы и анализ нормативной базы.** Во всех электро-технических устройствах (открытые и закрытые распределительные устройства, автоматические телефонные станции, насосно-перекачивающие станции, машинные и компьютерные залы и т.д.) одним из основных элементов является заземляющее устройство (ЗУ), которое обеспечивает нормальное функционирование оборудования и безопасность обслуживающего персонала [1]. Наиболее сложным по конструктивному выполнению является ЗУ открытых распределительных устройств (ОРУ) станций и подстанций напряжением 110 кВ и выше. В настоящий момент исправность таких ЗУ контролируется по следующим параметрам [2]:

- 1) конструктивному выполнению;
- 2) сопротивлению ЗУ;
- 3) напряжению прикосновения;
- 4) потенциалу на ЗУ.

В соответствии с [2] ЗУ электроустановок выше 1 кВ с глухозаземленной нейтралью могут выполняться по требованиям к допустимому сопротивлению или напряжению прикосновения. Однако, если при проектировании ЗУ по требованиям к напряжению прикосновения сопротивление ЗУ не нормируется, то при проектировании ЗУ по требованию к допустимому сопротивлению напряжение прикосновения также должно удовлетворять требованиям ПУЭ. Поэтому измерение или расчет значения напряжения прикосновения необходимо производить для ЗУ всех подстанций выше 1 кВ с глухозаземленной нейтралью.

На величину напряжения прикосновения влияет ряд факторов: амплитуда аварийного тока, сопротивление грунта, на котором расположена подстанция, сопротивление подстилающего слоя вблизи оборудования, а также конструктивное исполнение ЗУ. Грунт в районе расположения подстанций обычно имеет многослойную структуру, параметры которой определяются по результатам вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). При использовании существующей методики расчетов напряжения прикосновения [3] многослойную модель грунта приводят к двухслойной модели [4]. При этом в силу особенностей используемого математического аппарата, определяемые параметры двухслойной модели имеют статистический характер.

**Целью** настоящей работы является учет статистического характера параметров расчетной двухслойной модели грунта при определении значения напряжения прикосновения на оборудовании подстанции.

**Материалы и результаты исследования.** Как отмечалось выше, в настоящее время расчет напряжения прикосновения при возникновении на объекте аварийных режимов производится по математической модели ЗУ, использующей двухслойную модель грунта, разработанной в НИПКИ «Молния» [3]. В электроустановках выше 1000 В с глухозаземленной нейтралью наиболее частым аварийным режимом является однофазное короткое замыкание на землю (до 92 % от общего числа [5]). Для указанных объектов, которые не имеют в своем составе генерирующие мощности, от 70 до 100 % тока КЗ возвращается в систему через грунт, поэтому правильная интерпретация результатов ВЭЗ существенно влияет на полученные значения потенциалов. Напряжение прикосновения определяется как разность потенциала заданного оборудования и потенциала на поверхности земли на расстоянии 0,8 м от места обслуживания. Модель грунта, полученная по результатам ВЭЗ, характеризуется удельным сопротивлением первого слоя  $\rho_1$ , глубиной первого слоя  $h_1$ , удельным сопротивлением второго слоя  $\rho_2$  и максимальным относительным отклонением аппроксимирующей кривой от данных ВЭЗ  $\Delta$  (погрешность аппроксимации). Погрешность аппроксимации связана с двумя основными факторами:

1) грунт может иметь три и более слоев, что вызывает необходимость производить аппроксимацию многослойной структуры двухслойной. При этом вносится погрешность в процессе эквивалентирования сопротивлений слоев, а также глубины первого слоя. (зачастую она не совпадает с реальной глубиной первого слоя).

2) при аппроксимации многослойного грунта двухслойной моделью используются численные методы, для которых характерна ограниченная точность вычислений [4].

Программа аппроксимации данных ВЭЗ двухслойной моделью [4] включает метод генерирования случайной исходной точки процесса минимизации максимального отклонения  $\Delta$ . В силу сложного рельефа минимизируемой целевой функции это приводит к тому, что одно и тоже максимальное отклонение  $\Delta$  достигается при различных сочетаниях параметров двухслойной модели грунта  $\rho_1$ ,  $h_1$  и  $\rho_2$ . Так как именно эти параметры являются исходными данными

ми для математической модели, то при одной и той же погрешности аппроксимации  $\Delta$  можно получить различные значения напряжения прикосновения. При этом наборы численных значений  $\rho_1$ ,  $h_1$ ,  $\rho_2$  являются случайными, а, следовательно, и напряжение прикосновения является случайной величиной.

Для оценки степени влияния статистического характера параметров двухслойной модели грунта на напряжение прикосновения были проведены расчеты с использованием данных диагностики двух типов подстанций:

- тип 1: экспериментальные данные ВЭЗ хорошо согласуются с двухслойной моделью грунта (рис. 1, зависимость 5 набор экспериментальных точек);

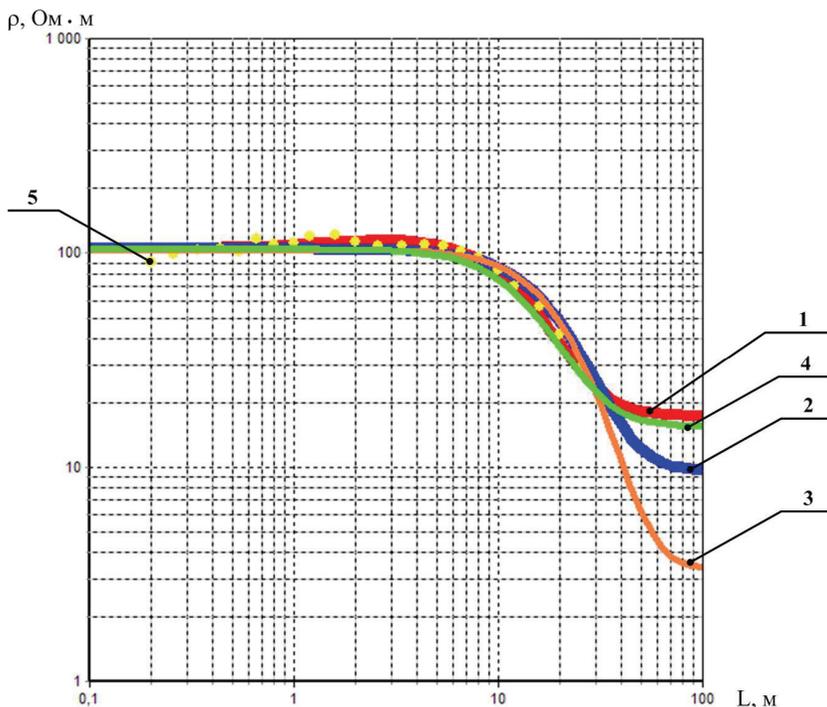


Рисунок 1 – Аппроксимация результатов ВЭЗ для подстанции первого типа:

- 1 – трехслойной моделью ( $\rho_1 = 105 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_1 = 0,8 \text{ м}$ ;  $\rho_2 = 120 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_2 = 7 \text{ м}$ ;  $\rho_3 = 17 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ );
- 2 – двухслойной моделью ( $\rho_1 = 104,24 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_1 = 12,51 \text{ м}$ ;  $\rho_2 = 9,35 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ );
- 3 – двухслойной моделью ( $\rho_1 = 103,43 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_1 = 13,58 \text{ м}$ ;  $\rho_2 = 3,26 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ );
- 4 – двухслойной моделью ( $\rho_1 = 104,35 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_1 = 9,3 \text{ м}$ ;  $\rho_2 = 15,23 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ );
- 5 – экспериментальные данные

- тип 2: экспериментальные данные ВЭЗ хорошо согласуются с трехслойной моделью грунта (рис. 2, зависимость 5 набор экспериментальных точек);

ных точек).

На рис. 1 и рис. 2 кривые 1 представляют аппроксимацию данных ВЭЗ трехслойной моделью, кривые 2 – 4 представляют варианты аппроксимации данных ВЭЗ двухслойной моделью с различными сочетаниями значений  $\rho_1$ ,  $h_1$ ,  $\rho_2$  при одной и той же погрешности аппроксимации ( $L$  – расстояние между токовыми электродами в опыте ВЭЗ).

На рис. 3 и рис. 4 приведена характерная плотность распределения значений напряжения прикосновения до и после выполнения рекомендаций по ремонту ЗУ (применительно к расчетной модели ЗУ).

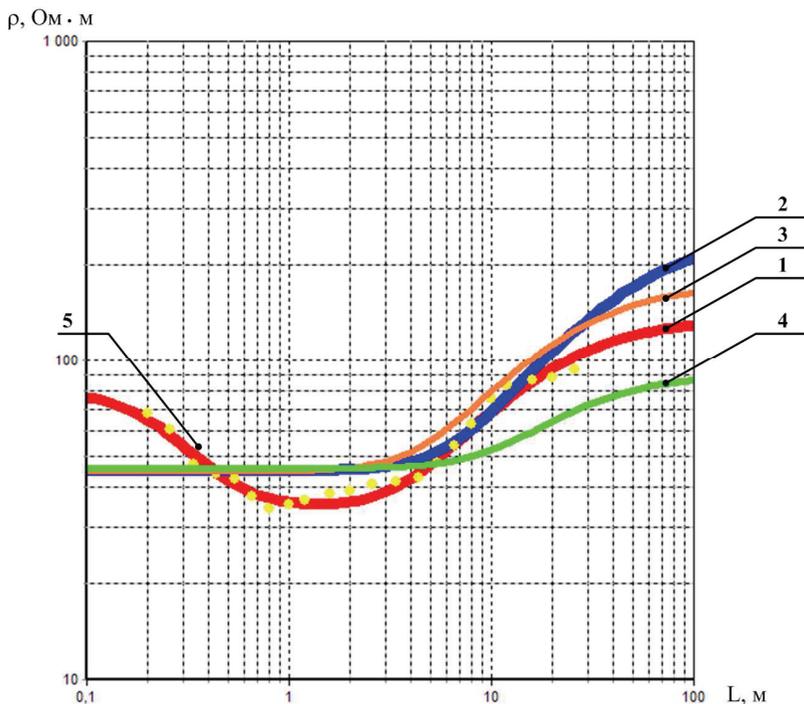


Рисунок 2 – Аппроксимация результатов ВЭЗ второго типа:

- 1 – трехслойной моделью ( $\rho_1 = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_1 = 0,17 \text{ м}$ ;  $\rho_2 = 34 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_2 = 3,8 \text{ м}$ ;  $\rho_3 = 134 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ );
- 2 – двухслойной моделью ( $\rho_1 = 44,88 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_1 = 7,47 \text{ м}$ ;  $\rho_2 = 246,88 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ );
- 3 – двухслойной моделью ( $\rho_1 = 44,79 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_1 = 5,02 \text{ м}$ ;  $\rho_2 = 172,4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ );
- 4 – двухслойной моделью ( $\rho_1 = 45,78 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_1 = 9,64 \text{ м}$ ;  $\rho_2 = 90,28 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ );
- 5 – экспериментальные данные

Данные получены для 50 случайных комбинаций параметров  $\rho_1$ ,  $h_1$ ,  $\rho_2$ , которые соответствуют одной и той же погрешности аппроксимации (для подстанции 1-го типа  $\Delta = 15 \%$ , для подстанции 2-го типа  $\Delta = 34 \%$ ). На рисунках

обозначено:  $q$  – плотность распределения значений напряжения прикосновения,  $U_{пр}$  – значение напряжения прикосновения,  $U_{пр\text{ ср}}$  – среднее значение напряжения прикосновения,  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение напряжения прикосновения.

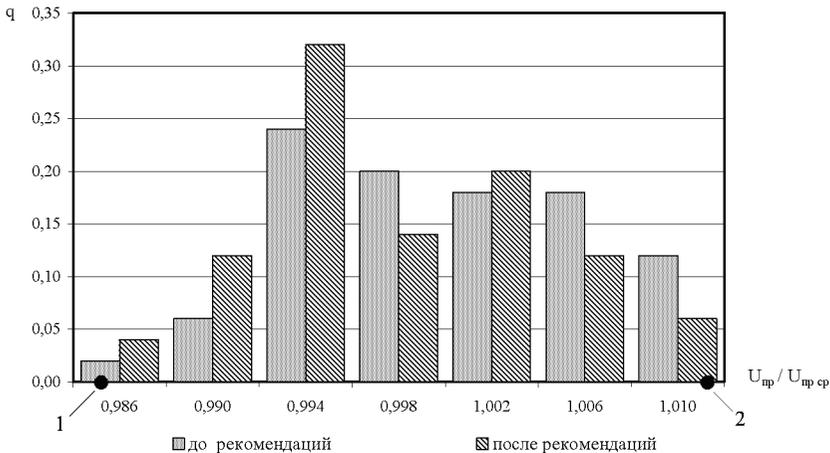


Рисунок 3 – Плотность распределения значений напряжения прикосновения для подстанции 1-го типа:

до выполнения рекомендаций ( $U_{пр\text{ ср}} = 249$  В;  $\sigma = 2$  В);  
 после выполнения рекомендаций ( $U_{пр\text{ ср}} = 204$  В;  $\sigma = 1,5$  В)

Проверка по критерию  $W$  [6] показала, что данные распределений могут подчиняться как нормальному закону, так и законам, отличным от нормального. Использование выборок (наборов параметров двухслойной модели) большого объема приводит к резкому возрастанию объема расчетов, а, следовательно, и времени обработки. В связи с этим был проведен анализ выборок минимального объема (3 набора параметров) для ряда подстанций. Результаты анализа показали, что коэффициент вариации напряжения прикосновения (определяемый по соотношению  $V = 100 \sigma / U_{пр\text{ ср}}$ , %) изменялся: для подстанций 1-го типа от 0,5 % до 1,2 %, для подстанций 2-го типа от 0,2 % до 12 %. Это подтверждает существенное влияние процедуры обработки данных ВЭЗ на величину напряжения прикосновения. Проверка показала, что распределение значений напряжения прикосновения могли, как подчиняться, так и отличаться от нормального закона.

Результаты проведенного анализа позволяют определять вероятность превышения напряжения прикосновения на оборудовании подстанции некоторой величины  $P(U_{пр} \geq U_{пр}^*)$  следующим образом.

В случае подтверждения нормального закона распределения напряжения прикосновения [7]

$$P(U_{пр} \geq U_{пр}^*) = 1 - N(U_{пр\text{ ср}}, \sigma, U_{пр}^*), \quad (1)$$

где  $U_{\text{пр}}^*$  – допустимое (граничное) значение напряжения прикосновения;  
 $N(U_{\text{пр ср}}, \sigma, U_{\text{пр}}^*)$  – значение функции нормального распределения при до-  
 пустимом значении напряжении прикосновения равного  $U_{\text{пр}}^*$ ;  
 $U_{\text{пр ср}}, \sigma$  – соответственно среднее значение напряжения прикосновения и  
 его среднее квадратическое отклонение.

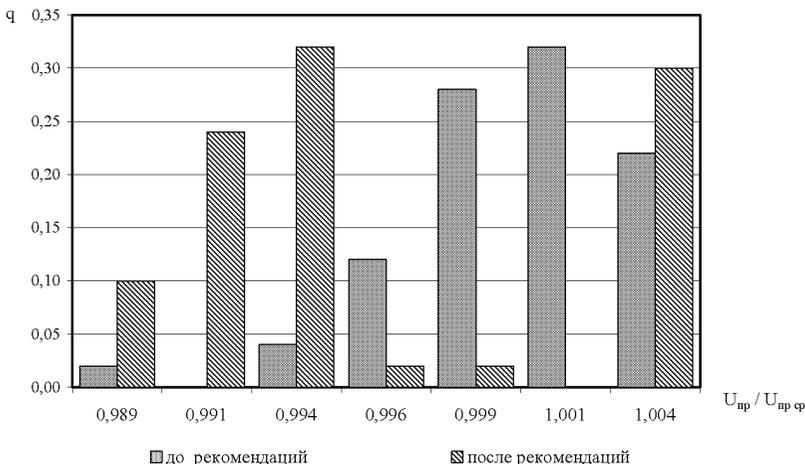


Рисунок 4 – Плотность распределения значений напряжения прикосновения для подстанции 2-го типа:  
 до выполнения рекомендаций ( $U_{\text{пр ср}} = 478 \text{ В}$ ;  $\sigma = 2 \text{ В}$ );  
 после выполнения рекомендаций ( $wU_{\text{пр ср}} = 154 \text{ В}$ ;  $\sigma = 4 \text{ В}$ )

В случае если распределение отличается от нормального, вероятность превышения значений напряжения прикосновения на оборудовании подстанции некоторой величины определяется по следующему соотношению:

$$P(U_{\text{пр}} \geq U_{\text{пр}}^*) = 1 - F(U_{\text{пр}}^*), \quad (2)$$

где  $F(U_{\text{пр}}^*)$  – значение функции распределения напряжения прикосновения при  $U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}^*$ .

Ввиду стремления к минимизации объема производимых расчетов, для вычисления  $F(U_{\text{пр}}^*)$  предлагается следующая упрощенная методика, исключая определение вида функции распределения  $F(U_{\text{пр}})$ .

Пусть нам известны три случайных значения напряжения прикосновения  $U_1 \leq U_2 \leq U_3$  (см. рис. 5), причем одновременное равенство всех трех значений исключается. Тогда ломаная кривая  $abcdefg$  является эмпирической функцией распределения напряжения прикосновения, построенной по методике, применяемой для дискретных значений [7]. Используя приведенную эмпирическую функцию распределения, можем дать верхнюю и нижнюю оценку ее значения  $F(U_{\text{пр}}^*)$  при некотором граничном значении напряжения прикосновения, для определения которых используется линейная интерполяция и экстраполяция.

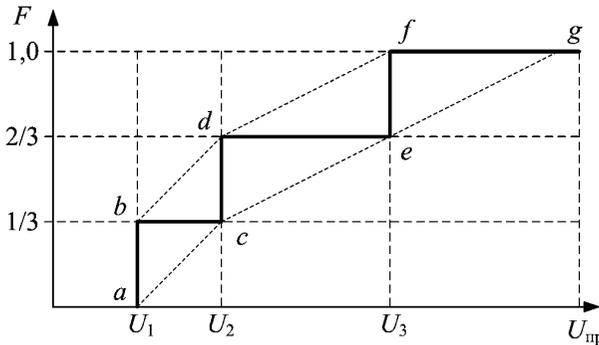


Рисунок 5 – Иллюстрация определения значений функции распределения

Если  $U_{\text{пр}}^*$  находится в интервале  $[U_1, U_2)$ , то нижняя граница  $ac$  и верхняя граница  $bd$  определяются по следующим соотношениям:

$$F(U_{\text{пр}}^*)_{\min} = F(a) + \frac{F(c) - F(a)}{U_2 - U_1}(U_{\text{пр}}^* - U_1); \quad (3)$$

$$F(U_{\text{пр}}^*)_{\max} = F(b) + \frac{F(d) - F(b)}{U_2 - U_1}(U_{\text{пр}}^* - U_1). \quad (4)$$

Если  $U_{\text{пр}}^*$  находится в интервале  $[U_2, U_3)$ , то для определения нижней граница  $ce$  и верхней граница  $df$  используются следующие соотношения:

$$F(U_{\text{пр}}^*)_{\min} = F(c) + \frac{F(e) - F(c)}{U_3 - U_2}(U_{\text{пр}}^* - U_2); \quad (5)$$

$$F(U_{\text{пр}}^*)_{\max} = F(d) + \frac{F(f) - F(d)}{U_3 - U_2}(U_{\text{пр}}^* - U_2). \quad (6)$$

где  $F(a), \dots, F(e)$  – значение эмпирической функции в точках  $a, \dots, e$ .

При  $U_{\text{пр}}^* \geq U_3$  нижняя граница  $eg$  и верхняя граница  $fg$  определяются следующим образом:  $F(U_{\text{пр}}^*)_{\min} = 1 - F(e)$  по соотношению (5),  $F(U_{\text{пр}}^*)_{\max} = 1$ .

В практических расчетах чаще всего вызывает интерес вероятность появления напряжения прикосновения превышающего  $U_3$ . Для этого варианта отличие верхней и нижней оценок всегда меньше чем разность  $1 - F(e)$ , которая уменьшается по мере увеличения граничного значения  $U_{\text{пр}}^*$ . Если все же отличие верхней и нижней оценок функции распределения не удовлетворяет практической потребности, то необходимо увеличить объем выборки. Далее привести проверку закона распределения и, в зависимости от ее результатов, вычислить вероятность по одному из рассмотренных вариантов.

Применяемая в настоящее время точечная оценка напряжения прикосновения [3] имеет два существенных недостатка.

Если рассчитанное значение напряжения прикосновения принадлежит левой области распределения (см. рис. 3, точка 1), то с большой вероятностью на оборудовании могут возникнуть более высокие значения напряжения прикосновения, которые могут превысить допустимую величину.

Если рассчитанное значение напряжения прикосновения принадлежит правой области распределения с малой плотностью появления (см. рис. 3, точка 2) и для него не выполняются условия допустимости, то принимаемые меры снижения напряжения прикосновения приведут к неоправданным затратам.

### **Выводы**

1. В работе предложен вероятностный подход к определению напряжения прикосновения с учетом статистического характера расчетов сопротивления грунта.

2. Предложена методика оценки возможности появления с заданной вероятностью опасного напряжения прикосновения.

3. Указаны направления проведения технико-экономического анализа необходимости принятия мер по снижению напряжения прикосновения.

Приведенные материалы могут служить базой для исследований статистической зависимости напряжения прикосновения от других определяющих его параметров.

**Список литературы:** 1. *Кац Е.Л.* Заземляющие устройства электроустановок высокого и низкого напряжений / *Е.Л. Кац, Б.Г. Меньшов, Ю.В. Целебровский* // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. электр. станции и сети. – М.: ВИНТИ, 1989. – Т. 15. – 158 с. 2. Правила улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Глава 1.7 Заземлення і захисні заходи електробезпеки / *М.А. Боролицький, І.Я. Карпець, В.В. Лях та ін.* – К.: Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики». – 2006. – 71 с. 3. *Линк И.Ю.* Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте / *И.Ю. Линк, Д.Г. Колушко, Г.М. Колушко* // Электронное моделирование. – 2003. – Т. 25, № 2. – С. 99-111. 4. *Петков О.О.* Визначення параметрів двошарової моделі ґрунту за результатами вертикального електричного зондування, проведеного в районі розташування підстанцій / *О.О. Петков, Д.Г. Колушко, І.Ю. Линк* // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. – № 2. – С. 3-11. 5. *Коновалова Л.Л.* Электроснабжение промышленных предприятий и установок / *Л.Л. Коновалова, Л.Д. Рожкова.* – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с. 6. СТ СЭВ 1190-78. Стандарт СЭВ Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. – М.: Изд-во стандартов. 1980. – 37 с. 7. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей / *Е.С. Вентцель.* – М.: Высшая школа, 2002. – 575 с.

*Поступила в редколлегию 14.03.2012.*

*Г.М.КОЛИУШКО*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
*П.Н.МЕЛЬНИКОВ*, инженер, НТУ «ХПИ»;  
*О.С.НЕДЗЕЛЬСКИЙ*, инженер, НТУ «ХПИ»;  
*А.А.ПЕТКОВ*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
*С.С.РУДЕНКО*, инженер, НТУ «ХПИ»;  
*А.Ю.ЧЕРНУХИН*, инженер, аспирант, НТУ «ХПИ»

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРАЖЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ДЛИННОЙ ИСКРОЙ**

У статті представлені результати експериментальних досліджень статистичних характеристик координат ураження іскровим розрядом площини в системі електродів «стрижень – площина», адекватної реальній моделі розвитку розряду блискавки в зоні орієнтації напряму на об'єкти, що знаходяться на поверхні землі. Представлені електричні параметри генератора, що моделює іскровий розряд. Проведено аналіз статистичних характеристик отриманих результатів та їх кореляції з геометрією моделюючої електродної системи.

The results of the experimental researches of the statistic characteristics of the coordinates of the spark discharge strikes to the plane in the electrode system «rod – plane» which is equal to the lightning in the zone of the orientation to the objects on the ground are presented. The electric parameters of the generator which can modelate the spark discharge are given. The analysis of the statistical characteristics of the received results and there connection with geometry of the simulator electrode system are described in this article.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований статистических характеристик координат поражения искровым разрядом плоскости в системе электродов «стержень – плоскость», адекватной реальной модели развития разряда молнии в зоне ориентации направления на объекты, которые находятся на поверхности земли. Представлены электрические параметры генератора, который моделирует искровой разряд. Проведен анализ статистических характеристик полученных результатов и их корреляции с геометрией моделирующей электродной системы.

**Постановка проблемы.** Молниезащите объектов различного назначения в настоящее время уделяется все более значительное внимание, что связано, в первую очередь, с опасными, а порой и катастрофическими последствиями поражения молнией различных объектов, обеспечивающих жизнедеятельность крупных промышленных центров. Одним из аспектов, обеспечивающих разработку систем молниезащиты, является совершенствование методов проектирования, которые базируются на соответствующих теоретических и экспериментальных данных по поражению разрядами молнии. Последнее обстоятельство требует разработки моделей развития разряда молнии и формирования зоны поражения этим разрядом различных объектов.

**Анализ публикаций.** Несмотря на значительный объем научных публикаций по вопросам молниезащиты и физике развития разряда молнии, в настоящее время исследования, связанные с распределением точек поражения различных объектов, представлены ограниченным рядом работ.

В одной из первых работ этого ряда [1] сделана попытка описания стати-

стическими методами поражения системы из трех стержней (защищаемый объект-стержень и два стержня-молниеотвода). В работе доказывается, что зависимость коэффициента поражаемости от расстояния между молниеотводами хорошо описывается функцией нормального распределения.

В работе [2] приводятся экспериментальные данные по распределению точек поражения плоскости, на которой расположен объект-стержень. Приведенные данные позволяют сделать качественную оценку плотности распределения точек поражения.

Следующий шаг в описании распределения точек поражения плоскости сделан в [3]. Работа содержит графический материал, который позволяет дать численную оценку параметрам распределения мест поражения электрода-плоскости разрядами длиной искры.

Таким образом, приведенный анализ показывает, что одним из центральных направлений исследований в области молниезащиты является изучение распределения мест поражения различных объектов, так как только наличие данной информации позволит с достаточной полнотой изучить эффекты, вносимые установкой молниеотводов.

**Целью** настоящей работы является формирование и анализ набора экспериментальных данных по статистическому распределению точек поражения заземленной плоскости в системе электродов «стержень – плоскость».

**Материалы и результаты исследований.** Формирование набора экспериментальных данных проводилось на базе высоковольтного электрофизического стенда ГИН-1,2 (НИПКИ «Молния»), у которого был модернизирован генератор импульсов напряжения (ГИН) с целью получения импульса напряжения с амплитудно-временными параметрами, удовлетворяющими цели запланированных работ.

В соответствии с рекомендациями, основанными на опыте исследования характеристик молниевых разрядов, представленными в ряде публикаций [4–6], был проведен ряд работ по реализации в испытательных стендах амплитудно-временных параметров импульсов напряжения и тока, адекватных физической модели развития молнии в системе «облако – земля».

Эквивалентная электрическая схема разрядного контура стенда представлена на рис. 1

В табл. 1 приведены расчетные значения величин параметров элементов схемы разрядного контура стенда ГИН-1,2 представленной на рис. 1.

Максимальное напряжение на выходе (на РП) ГИН-1,2 – 800 кВ. Полярность импульса положительная.

Общий вид испытательного стенда показан на рис. 2. На рис. 3 показаны основные геометрические размеры электродной системы испытательного стенда ГИН-1,2, реализующие пробой промежутка «стержень-плоскость».

Стержневой электрод 3 представляет собой стержень, изготовленный из стального шестигранника (размер «под ключ»  $S = 19$  мм) длиной 800 мм, закрепленного по центру симметрии плоского верхнего (высоковольтного) электрода с размерами (в плане)  $(4000 \times 5240)$  мм<sup>2</sup>.

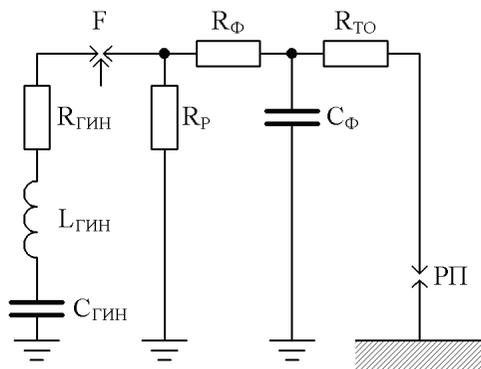


Рисунок 1 – Эквивалентная электрическая схема разрядного контура стенда:  $C_{ГИН}$ ,  $L_{ГИН}$ ,  $R_{ГИН}$  – емкость, индуктивность и активное сопротивление разрядной цепи ГИН соответственно;  $F$  – эквивалент управляемого разрядника ГИН;  $R_Р$  – разрядный резистор;  $R_{ТО}$  – токоограничивающий резистор;  $R_Ф$  – резистор, формирующий фронт импульса;  $C_Ф$  – емкость, формирующая фронт импульса;  $РП$  – разрядный промежуток.

Таблица 1 – Параметры элементов разрядного контура

	$C_{ГИН}$ , нФ	$L_{ГИН}$ , мкГн	$R_{ГИН}$ , Ом	$R_Р$ , кОм	$R_Ф$ , кОм	$C_Ф$ , нФ	$R_{ТО}$ , кОм
ГИН-1,2	30	13	130	415	680	0,2	0

Верхний электрод подвешен над нижним с помощью четырех капроновых канатов, закрепленных по углам электрода. Система подвеса дает возможность регулировки расстояния  $H$  между плоскостями. Верхний электрод снабжен по краям противокоронными экранами.

Нижний электрод представляет собой заземленную проводящую плоскость с размерами  $(4000 \times 6690) \text{ мм}^2$ . Длина разрядного промежутка (РП)  $h = 1260 \text{ мм}$ .

Характерные осциллограммы напряжения на РП показаны на рис. 4 и рис. 5. Фотографии импульсных разрядов показаны на рис. 6 и рис. 7.

При анализе осциллограмм импульса напряжения установлено, что при времени нарастания напряжения до максимума (1000 мкс) пробой РП происходил в диапазоне времен от 400 мкс до 850 мкс, что соответствует 75 % и 98 % максимального напряжения импульса.

Регистрация мест поражения производилась с использованием бумажного шаблона, накладываемого на электрод-плоскость (рис. 8).

Как видно из рис. 3, эксперименты проводились на стенде, у которого система электродов не обладает полной симметрией относительно вертикальной оси верхнего электрода. Данное обстоятельство потребовало проверки влияния несимметричности электродной системы на распределение точек поражения, ввиду того, что развитие разряда связано с конфигурацией электрического поля [1, 2].



Рисунок 2 – Общий вид  
стенда ГИН-1,2

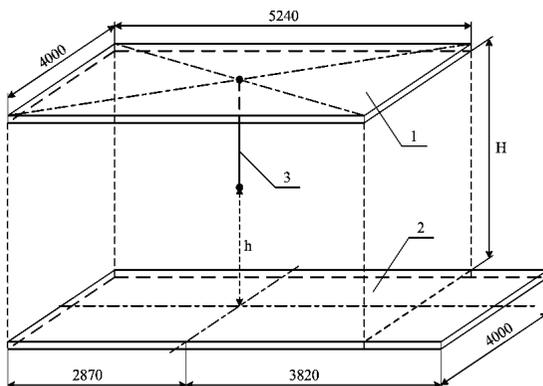


Рисунок 3 – Электродная система:  
1 – верхняя плоскость (высоковольтный электрод); 2 – нижняя плоскость (заземленный электрод); 3 – стержневой электрод;  $h$  – длина воздушного разрядного промежутка;  $H$  – расстояние между верхним и нижним плоскими электродами

На рис. 9 показаны размеры нижнего электрода разрядной системы. Точка «0» является проекцией вертикальной оси верхнего электрода – стержня. Цифрами 1-4 обозначены секторы, используемые при анализе распределения точек поражения. Каждый сектор имеет угол  $90^\circ$  и располагается симметрично одной из полуосей.

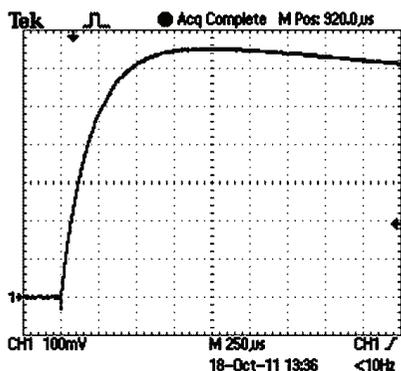


Рисунок 4 – Осциллограмма импульса напряжения при отсутствии пробоя РП

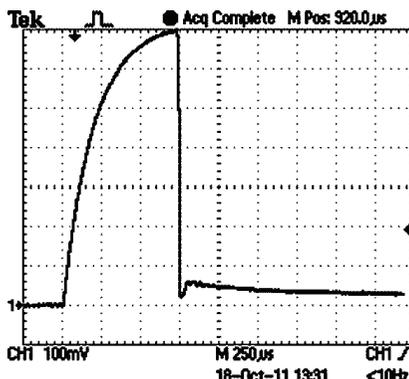


Рисунок 5 – Осциллограмма импульса напряжения при пробое РП в момент времени  $t = 725$  мкс

Полученные данные по распределению точек поражения были сгруппированы по указанным секторам. Результаты приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, в сектор 3 попало наименьшее количество точек поражения.

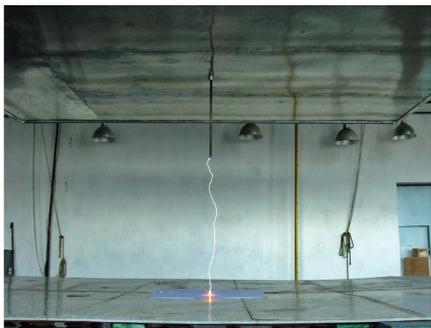


Рисунок 6 – Импульсный пробой РП



Рисунок 7 – Фрагмент канала разряда со стержня

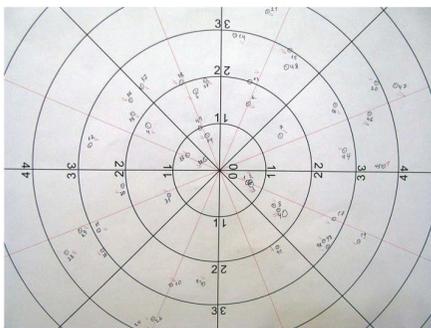


Рисунок 8 – Фрагмент шаблона с отмеченными точками сквозного пробова единичным разрядом

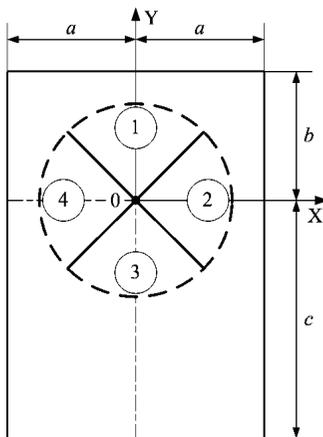


Рисунок 9 – Схема размеров электрода – плоскости:  
 $a = 2$  м;  $b = 2,87$  м;  $c = 3,82$  м

Таблица 2 – Результаты обработки данных экспериментов

Номер сектора	Направление по осям	Количество поражений, $n_i$	Относительная частота, $w_i$	$U_{набл}$
1	+Y	61	0,261	0,377
2	+X	67	0,386	1,283
3	-Y	46	0,197	-1,887
4	-X	60	0,256	0,226

Очевидно, что при полной симметрии электродной системы вероятность попадания в любой сектор  $p_0 = 0,25$ . Из таблицы видно, что наблюдаемые относительные частоты попадания в сектор  $w_i$  отличаются от вероятности  $p_0$  как в большую, так и в меньшую сторону. Оценку существенности отклонения наблюдаемых относительных частот от вероятности  $p_0$  произведем с использованием следующего критерия [7]:

$$U_{\text{набл}} = \frac{(w_1 + p_0) \cdot \sqrt{n}}{\sqrt{p_0 \cdot (1 - p_0)}}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{набл}}$  – наблюдаемое значение критерия;  $w_i$  – относительная частота;  $p_0$  – гипотетическая вероятность;  $n$  – количество экспериментальных данных.

Результаты вычисления наблюдаемого критерия по (1) приведены в табл. 2.

При уровне значимости  $\alpha = 0,05$  проверяем нулевую гипотезу  $H_0$ : о равенстве неизвестной вероятности  $p$  (оценкой которой является  $w_i$ ) гипотетической вероятности  $p_0$  при конкурирующей гипотезе  $H_1$ :  $p > p_0$  (если  $w_i > p_0$ ) или  $p < p_0$  (если  $w_i < p_0$ ).

Критическое значение критерия  $U_{\text{кр}} = 1,645$  [7].

Гипотеза  $H_0$  принимается если:

$$\begin{aligned} U_{\text{набл}} < U_{\text{кр}}, \text{ при } H_1: p > p_0; \\ U_{\text{набл}} > -U_{\text{кр}}, \text{ при } H_1: p < p_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Как видно из табл. 2, для секторов 1, 2 и 4 исходя из условий (2) принимается нулевая гипотеза  $H_0$ , что позволяет считать несущественным превышение относительных частот над вероятностью  $p_0$ ; для сектора 3 нулевая гипотеза отвергается и принимается конкурирующая гипотеза  $H_1$ :  $p < p_0$ .

Это позволяет сделать вывод, что увеличенное значение размера «с» (см. рис. 9) существенно повлияло на количество точек поражения в направлении «-Y».

Для теоретического обоснования выявленного факта рассмотрим геометрическую модель поражения плоскости разрядом, показанную на рис. 10.

На изоляционной поверхности 1 расположена проводящая плоскость 2 имеющая форму бесконечно тонкого диска радиусом  $r_{\text{max}}$ . Над плоскостью 2 на оси диска располагается стержень 3, нижний конец которого находится на высоте  $H$ , над плоскостью. Траектория прямолинейного разряда со стержня 3 на плоскость 1 определяется углом движения  $\Theta$ , имеющим случайный характер. Угол движения  $\Theta$  изменяется в интервале от 0 до  $\Theta_{\text{max}}$ . Определим плотность распределения вероятности поражения точек, расположенных на радиусе плоскости прямолинейным разрядом. Из рис. 10 видно, что

$$\Theta_{\text{max}} = \arctg \frac{r_{\text{max}}}{H}. \quad (3)$$

Для произвольного угла движения  $\Theta$ , величина  $r$  определяется из соотношения

$$r = H \cdot \tg \Theta. \quad (4)$$

Пусть угол движения  $\Theta$  равномерно распределен в интервале

$\left[0, \operatorname{arctg} \frac{r_{\max}}{H}\right]$ . Тогда используя рекомендации, изложенные в [8], можно показать, что плотность распределения поражений окружности радиуса  $r$  определится из следующего соотношения

$$g(r) = \frac{1}{\operatorname{arctg} \frac{r_{\max}}{H}} \cdot \frac{1}{H} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{r}{H}\right)^2}, \quad (5)$$

где  $r \in [0, r_{\max}]$ ; при  $r \notin [0, r_{\max}]$  соответственно  $g(r) = 0$ .

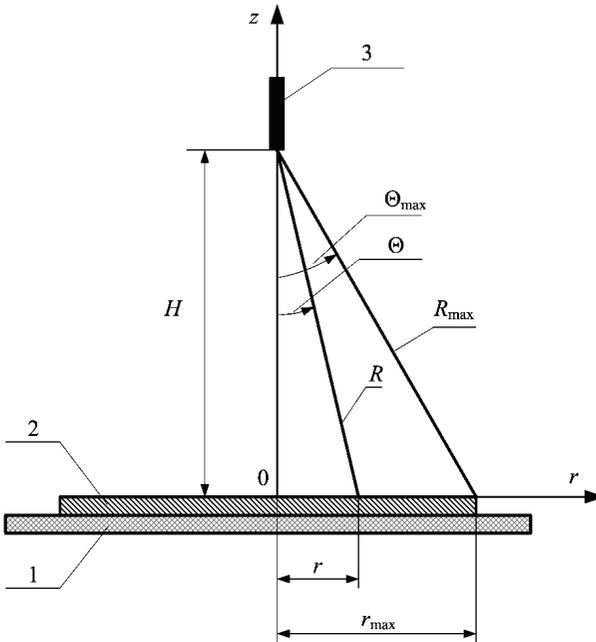


Рисунок 10 – Модель поражения осесимметричной плоскости прямолинейным разрядом

На рис. 11 показаны графики изменения  $g(r)$ , рассчитанные по (5) для характерных размеров электрической системы, использованной при экспериментальных исследованиях (см. рис. 3).

Как видно из рис. 11 плотность вероятности  $g(r)$  тем меньше, чем больше радиус диска. Таким образом, полученные расчетные данные по характеру изменения согласуются с экспериментальными и объясняют уменьшение количества поражения плоскости в направлении «-Y». Проведенное численное моделирование процесса поражения оси [9] показало результаты аналогичные, приведенным на рис. 11.

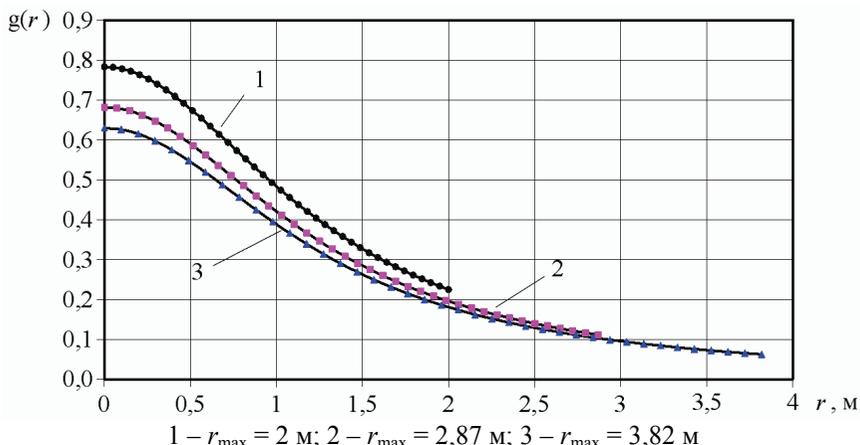


Рисунок 11 – Изменение плотности вероятности поражения точек радиуса  $r$

## Выводы

1. Получены экспериментальные данные по поражению длинной искрой заземленной плоскости.

2. Проведенный анализ экспериментальных данных, теоретические расчеты и численное моделирование показали, что для обеспечения симметричности распределения точек поражения по различным направлениям расстояния по осям от проекции вертикальной оси верхнего электрода-стержня до края нижнего электрода плоскости не должны отличаться более чем в 1,43 раза.

Материалы статьи будут использованы для планирования дальнейших экспериментальных исследований по поражению длинной искрой различных объектов.

**Список литературы:** 1. К вопросу об оценке защитного действия молниеотводов / Г.Н. Александров, М.М. Зеленецкий, В.Л. Иванов и др. // Известия академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1970. – № 3. – С. 48-54. 2. Об ориентировке канала длинной искры / Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, Э.М. Базелян, Е.С. Садыхова // Электричество. – 1973. – № 3. – С. 63-66. 3. Волкова О.В. Поражаемость искровым разрядом стержня на плоскости / О.В. Волкова, А.Р. Корявин // Электричество. – 1991. – № 5. – С. 52-55. 4. Александров Г.Н. Молния и молниезащита / Г.Н. Александров. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 280 с. – ISBN 5-7422-1432-4. 5. Базелян Э.М. Физика молнии и молниезащиты / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с. – ISBN 5-9221-0082-3. 6. Курчиенко В.М. Методика и результаты испытаний по определению угла защиты  $\alpha$  для отдельно стоящих стержневых и тросовых молниеотводов / В.М. Курчиенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Техніка і електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 17. – С. 24-32. 7. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2004. – 404 с. 8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель – М.: Высшая школа, 2002. – 575 с. 9. Колушико Д.Г. Статистическая двумерная модель разряда молнии на бесконечный прямолинейный проводник / Д.Г. Колушико, А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Техніка і електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХПІ». – 2011. – № 16. – С. 118-126.

Поступила в редколлегию 14.03.2012.

**В.И.КРАВЧЕНКО**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**Ф.ВЛОСЕВ**, канд. техн. наук., науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
**И.В.ЯКОВЕНКО**, д-р физ.-мат.наук, главн. науч. сотр, НТУ «ХПИ»

## **ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В 2 –D ЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУРАХ ТОКАМИ, НАВЕДЕННЫМИ ВНЕШНИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Побудовано теорію взаємодії потоку заряджених часток з плазмонами, які існують у двовірному електронному 2D газі. Припускається, що електрони у потоці, який перетинає область локалізації 2D газу, являє собою хвильовий пакет, енергетична ширина якого мала у порівнянні з енергією плазмона. Тому їх взаємодію з полем плазмона необхідно описувати рівнянням Шредингера. Отримано рівняння, що характеризує зміну амплітуди поля плазмона, та знайдено інкремент нестійкості.

A theory of interaction of charged flow with plasmons existing in two-dimentional ( 2D ) electron gas is constructed. It is supposed that electrons in the flow that crosses a localization region of 2D gas represents a wave packet. The energy width of wich is small as compared with plasmon energy. Therefore their interaction with the plasmon field is described by the Shrodinger equation. In the present work an equation is obtained characterizing the change of the plasmon field and the instability increment is found.

Построена теория взаимодействия потока заряженных частиц с плазмонами, которые существуют в двумерном электронном 2D газе. Предполагается, что электроны в потоке, который пересекает область локализации 2D газа, представляет собой волновой пакет, энергетическая ширина которого мала по сравнению с энергией плазмонов. Поэтому их взаимодействие с полем плазмонов необходимо описывать уравнением Шредингера. Получены уравнения, характеризующие изменение амплитуды поля плазмонов, и найдены инкременты неустойчивости.

**Введение.** Известно, что интерес к структурам, в которых образуется двумерный (2D) электронный слой, связан с их уникальными свойствами (квантовый эффект Холла. Особенности фазовых переходов и т.д.) В последние годы в связи с созданием наноструктур исследования этих свойств становятся особенно актуальными. В частности при определении механизмов формирования ультратонких слоев важным является изучение плазменных колебаний, обусловленных коллективным поведением 2D газа. В настоящей работе исследуется механизм взаимодействия потока заряженных частиц, наведенных внешним электромагнитным излучением с плазменными колебаниями 2D электронного слоя. При этом основное внимание уделялось влиянию границы на поведение частиц пучка.

**Основные результаты.** Рассмотрим плазмоподобный слой толщиной  $2a$ , окруженный средами с диэлектрическими постоянными  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ . Пусть ось  $Ox$  направленно параллельно, а  $Oy$  – перпендикулярно границам слоя, так что слой занимает пространство  $-a \leq y \leq a$ . Поведение электронов будем описывать уравнением Шредингера:

$$\frac{\hbar^2}{2m^*} \left( \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial y^2} \right) + (\epsilon_k - U(y)) \psi_k = 0, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_k$  – энергия частицы,  $m_e$  – эффективная масса,  $V(y)$  – потенциальный барьер:  $U(y) = -U_0$  при  $-a \leq y \leq a$ . Вне слоя  $y > a$ ,  $y < -a$  потенциальный барьер отсутствует. Покажем, что в поле этого потенциала существуют поверхностные электронные состояния. Учет конечной толщины барьера позволяет уточнить условия существования поверхностных электронных состояний.

Для нахождения спектра электронных состояний представим решение уравнения (1) в следующем виде:

$$\begin{aligned} y > a, \psi_k &= A_k e^{-\chi y + ik_x x}; \chi = \sqrt{k_x^2 - \frac{2m_e \varepsilon_k}{\hbar^2}} > 0. \\ -a \leq y \leq a, \psi_k &= (B_k e^{iky} + C_k e^{-iky}) e^{ik_x x}; \\ y < -a, \psi_k &= D_k e^{\chi y + ik_x x}, k = \sqrt{\frac{2mU_0}{\hbar^2} - \chi^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Видно, что волновая функция осциллирует, а вне слоя ее амплитуда убывает по экспоненциальному закону. Воспользовавшись условиями непрерывности волновых функций и их производных на плоскостях  $y = \pm a$ , получим дисперсионное соотношение в виде:

$$\chi = k \operatorname{tg} ka. \quad (3)$$

При этом:  $2B_k \cos ka = A_k e^{-\chi a}$ ,  $C_k = B_k$ ,  $D_k = A_k$ .

При условии  $ka \ll 1$  из формулы (3) находим спектр поверхностных электронных состояний  $\chi = \frac{2mU_0}{\hbar^2} a$ . Таким образом, условие существования поверхностных состояний с законом дисперсии

$$\varepsilon_k = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m_e} - \frac{2m_e U_0^2 a^2}{\hbar^2} \quad (4)$$

определяется неравенством:

$$\frac{\hbar^2}{2m_e a^2} \gg U_0.$$

Область локализации электронов превосходит толщину слоя  $2a$ . Полагая, что зависимость потенциального барьера имеет вид  $U(y) = -V_0 \delta(y)$ ,  $V_0 > 0$  и учитывая равенство волновых функций на границе и разрыв их производных, получим следующий закон дисперсии поверхностных электронных состояний:

$$\varepsilon_k = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m_e} - \frac{m_e V_0^2}{2\hbar^2} \quad (5)$$

Если ввести обозначения  $\chi_0 = \sqrt{\frac{2mU_0}{\hbar^2}}$ ,  $\frac{\chi}{\chi_0} = \eta$ , то уравнение (4) можно представить в виде:

$$\eta = \sqrt{1 - \eta^2} \operatorname{tg} \left( \chi_0 a \sqrt{1 - \eta^2} \right). \quad (6)$$

Зависимость  $\eta(\chi a)$ , определяющая область существования поверхностных электронных состояний, представляет собой набор кривых, аналогичных дисперсионным характеристикам для электромагнитных полей, распространяющихся в слое диэлектрика. Ограничимся случаем  $\chi_0 a \ll 1$ . Принимая во внимание, что плотность электронов  $N(y) = \sum_k \psi_k^* \psi_k$ , получаем

$$N(y) = N_0 e^{-2\chi|y|}. \quad (7)$$

Предполагается, что электроны в слое компенсируются фоном положительно заряженных частиц.

Предположим далее, что через слой проходит внешний поток электронов из области «1» в область «2». Частицы в пучке описываются волновыми функциями:

$$\begin{aligned} \psi_0^{(p)} &= f_p \exp i(k_{yp} y - \omega_{k_0} t); \quad \omega_{k_0} = \frac{E_{k_0}}{\hbar}; \\ k_1 &= k_2 = -k_3; \quad k_0 = \sqrt{\frac{2mE_{k_0}}{\hbar^2}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $E_{k_0}$  – энергия частицы, падающей на слой,  $m$  – ее масса, индексы  $p = 1, 2, 3$  соответствуют волновым функциям для падающих, прошедших и отраженных частиц. Связь амплитуд волновых функций  $\psi_0^{(p)}$  определяется из граничных условий. Полагая, что толщина слоя бесконечно мала, считаем, что зависимость потенциала  $U(y)$  имеет  $\delta$  – образный характер. Граничные условия для  $\psi_0^{(p)}$  при  $y = 0$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \psi_0^{(1)} + \psi_0^{(3)} &= \psi_0^{(2)}, \\ \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial \psi_0^{(1)}}{\partial y} + \frac{\partial \psi_0^{(3)}}{\partial y} - \frac{\partial \psi_0^{(2)}}{\partial y} \right) &= V_0 \psi_0^{(2)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Из выражения (9) получаем  $f_2 = \frac{k_0}{k_0 - i\chi} f_1$ ,  $f_3 = \frac{i\chi}{k_0 - i\chi} f_1$ . Амплитуда связана

с концентрацией электронов в пучке соотношением  $|f_1|^2 = n_0$ . Для описания взаимодействия потока частиц с электромагнитными колебаниями, обусловленными коллективным поведением  $2D$  электронного газа, будем исходить из следующей системы уравнений для каждой из сред:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= 0; \\ \operatorname{div} \varepsilon(y) \vec{E} &= 4\pi e(n + N); \\ e \frac{\partial N}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{J} &= 0; \\ e \frac{\partial n^{(p)}}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}^{(p)} &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $n^{(p)}, \vec{j}^{(p)}, N, \vec{J}$  – неравновесные концентрации носителей и токи, создаваемые полями в пучке и слое.

Систему уравнений (10) необходимо дополнить материальными уравнениями. Концентрацию в пучке определим через возмущенную  $\Psi^{(r)}$  и невозмущенную  $\Psi_0^{(p)}$  волновые функции электронов и векторный потенциал  $A$ , связанный с электрическим полем соотношением  $\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t}$ ; ( $r = 1, 2$ ) (калибровка выбрана таким образом, чтобы скалярный потенциал  $\varphi = 0$ ). Возмущенная волновая функция  $\Psi^{(r)}$  в первом приближении по  $A$  находится из уравнений Шредингера для каждой из сред:

$$\begin{aligned} i\hbar \frac{\partial \Psi^{(1)}}{\partial t} - H^{(0)} \Psi^{(1)} &= H^{(1)} (\Psi_0^{(1)} + \Psi_0^{(3)}), \quad y < 0; \\ H^{(0)} &= -\frac{\hbar^2 \Delta}{2m}; \quad H^{(1)} = \frac{ieh}{2mc} (\vec{\nabla} \vec{A} 1 + \vec{A} 1 \vec{\nabla}); \\ \hbar \frac{\partial \Psi^{(2)}}{\partial t} - H^{(0)} \Psi^{(2)} &= H^{(2)} \Psi_0^{(2)}, \quad y > 0; \\ H^{(2)} &= \frac{ieh}{2mc} (\vec{\nabla} \vec{A} 2 + \vec{A} 2 \vec{\nabla}). \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда концентрации электронов и токи в пучке можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} n &= n^{(1)} + n^{(3)}; \quad n^{(p)} = \Psi_0^{(p)} \Psi^{(1)*} + \Psi_0^{(p)*} \Psi^{(1)}; \quad p = 1, 3; \quad y < 0; \\ \vec{j} &= \vec{j}^{(1)} + \vec{j}^{(3)}; \\ \vec{j}^{(p)} &= \frac{ie\hbar}{2m} \{ \Psi^{(1)} \nabla \Psi_0^{(p)*} - \Psi^{(1)*} \nabla \Psi_0^{(p)} + \Psi_0^{(p)} \nabla \Psi^{(1)*} - \\ &- \Psi_0^{(p)*} \nabla \Psi^{(1)} \} - \frac{e^2}{mc} |f_p|^2 A_1; \quad p = 1, 3. \\ n &= n^{(2)}; \quad n^{(2)} = \Psi_0^{(2)} \Psi^{(2)*} + \Psi_0^{(2)*} \Psi^{(2)}; \quad y > 0; \\ j &= \vec{j}^{(2)}; \\ \vec{j}^{(2)} &= \frac{ie\hbar}{2m} \{ \Psi^{(2)} \nabla \Psi_0^{(2)*} - \Psi^{(2)*} \nabla \Psi_0^{(2)} + \Psi_0^{(2)} \nabla \Psi^{(2)*} - \\ &- \Psi_0^{(2)*} \nabla \Psi^{(2)} \} - \frac{e^2}{mc} |f_p|^2 A_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Ток в слое  $\vec{J} = [J, 0]$  определяется следующим соотношением:

$$J = -\frac{e^2 N(y)}{m_e c} A_{1x}$$

Пространственную дисперсию проводимости слоя, обусловленную перехода-

ми электронов между различными состояниями вследствие их рассеяния на потенциале мы учитываем, полагая температуру электронов равной нулю. На границе раздела сред  $y = 0$  выполняются электродинамические условия:

$$A_{1x}(0) = A_{2x}(0);$$

$$\varepsilon_{01} \frac{\partial^2 A_{1y}}{\partial t^2} + \varepsilon_{02} \frac{\partial^2 A_{2y}}{\partial t^2} + 4\pi c(\bar{j}_y^{(1)} + \bar{j}_y^{(3)} - \bar{j}_y^{(2)}) = \frac{4\pi e^2 N_0 d}{m} \frac{\partial A_{1x}}{\partial x}; \quad (13)$$

$$d = \frac{\hbar^2}{mV_0},$$

а также условия для возмущенных волновых функций электронов пучка:

$$\Psi^{(1)}(0) = \Psi^{(2)}(0);$$

$$\left. \frac{\partial \Psi^{(1)}}{\partial y} - \frac{\partial \Psi^{(2)}}{\partial y} \right|_{y=0} = 2\chi \Psi^{(1)}(0).$$

Поскольку взаимодействие волн и частиц предполагается слабым, то решение приведенных уравнений находится методом последовательных приближений. В первом приближении полагаем концентрацию электронов пучка и частоту столкновений равной нулю  $n_0 \rightarrow 0$ ;  $\nu \rightarrow 0$ . Тогда решение системы уравнений Максвелла и материальных уравнений можно представить через величину векторного потенциала. Поскольку  $\text{rot } \vec{A} = 0$ ;  $\text{div } \vec{A} = 0$  имеем:

$$A_{1x} = A e^{-qy} \cos \alpha; \quad A_{1y} = -A e^{-qy} \sin \alpha; \quad y > 0;$$

$$A_{2x} = A e^{qy} \cos \alpha; \quad A_{2y} = A e^{qy} \sin \alpha; \quad y < 0, \quad (14)$$

где  $\alpha = qx - \omega_s t + \theta$ ,  $\omega_s = \left[ \frac{4\pi e^2 N_0 qd}{m_e(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right]^{1/2} = \omega_0 \left[ \frac{qd}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right]^{1/2}$  – частота плазмонов двумерного электронного газа,  $\omega_0 = \left[ \frac{4\pi e^2 N_0}{m_e} \right]^{1/2}$   $N_0 d = N_{0s}$  – поверхностная плотность заряда.

Если диэлектрические проницаемости сред 1–2 обладают частотной дисперсией  $\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - \frac{\omega_{0i}^2}{\omega^2}$  то частота поверхностных плазмонов  $\omega_s = \frac{\Omega_s}{\sqrt{\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02}}}$ ,

где  $\Omega_s = \sqrt{\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2 + \omega_0^2 qd}$ .

Учтем теперь конечную плотность пучка и получим уравнение, описывающее медленное изменение во времени амплитуды поля плазмона

$\left| \frac{\partial A}{\partial t} \right| \ll \omega_s A$ . Для этого необходимо, подставив в правую часть уравнений (12)

выражения для потенциала (13), найти их решения, удовлетворяющие гранич-

ному условию. Затем следует найти возмущенные концентрации электронов и токи в пучке, поля, создаваемые промодулированным пучком и удовлетворить граничным условиям.

Решение уравнения Шредингера представляет собой сумму решений однородного и неоднородного уравнений. Из правой части уравнений (11) следует, что их решения описывают состояния электронов с энергиями  $\hbar\omega_{\pm} = \hbar(\omega_{k_0} \pm \omega_s)$ , возникающими в результате их взаимодействия с плазмонами. Поэтому, возмущенным волновым функциям  $\psi^{(r)}$  в дальнейшем снизу будем приписывать индексы «+» или «-». Тогда  $\psi^{(r)} = \psi_+^{(r)} + \psi_-^{(r)}$ . Таким образом, решения уравнений (11) с граничными условиями принимают вид:

$$\begin{aligned}\psi_{\pm}^{(1)} &= -i \frac{\Omega}{2\omega_s} \psi_0^{(1)} F_1^{\pm} e^{\pm i\alpha}; \\ \psi_{\pm}^{(2)} &= i \frac{\Omega}{2\omega_s} \psi_0^{(2)} F_2^{\pm} e^{\pm i\alpha}; \\ F_1^{\pm} &= \left(1 - \frac{k_0 + i\chi}{k_{\pm} - i\chi}\right) e^{-i(k_0 + k_{\pm})y} - e^{qy} \left[1 - \frac{i\chi}{k_0 - i\chi} e^{-2ik_0 y}\right]; \\ F_2^{\pm} &= \left(\frac{k_0 + i\chi}{k_{\pm} - i\chi}\right) e^{i(k_{\pm} - k_0)y} - \frac{k_0}{k_0 - i\chi} e^{-qy}.\end{aligned}\tag{15}$$

Здесь

$$\hbar\Omega = \frac{ev_0 A}{c}; \quad v_0 = \frac{\hbar k_0}{m}; \quad k_{\pm} = \sqrt{k_0^2 \pm \frac{2m\omega_s}{\hbar}}.$$

Тогда выражения для концентрации  $n^{(p)} = n_+^{(p)} + n_-^{(p)}$  приобретают вид:

$$\begin{aligned}n^{(1)} &= \Psi_0^{(1)*} (\Psi_+^{(1)} + \Psi_-^{(1)}) + \kappa.c. = \\ &= -i \frac{\Omega n_0}{2\omega_s} (F_1^+ e^{i\alpha} + F_1^- e^{-i\alpha}) + \kappa.c.; \\ n^{(2)} &= \Psi_0^{(2)*} (\Psi_+^{(2)} + \Psi_-^{(2)}) + \kappa.c. = \\ &= i \frac{\Omega k_0 n_0}{2\omega_s (k_0 + i\chi)} (F_2^+ e^{i\alpha} + F_2^- e^{-i\alpha}) + \kappa.c.; \\ n^{(2)} &= \Psi_0^{(3)*} (\Psi_+^{(1)} + \Psi_-^{(1)}) + \kappa.c. = \\ &= -\frac{\chi \Omega k_0 n_0}{2\omega_s (k_0 + i\chi)} e^{2ik_0 y} (F_1^+ e^{i\alpha} + F_1^- e^{-i\alpha}) + \kappa.c.\end{aligned}\tag{16}$$

Ограничимся случаем:  $k_0^2 \gg \frac{\omega_s^2}{v_0^2}$ . Тогда имеем:  $k_{\pm} = k_0 \pm \frac{\omega_s}{v_0}$ . Это значит, что разброс импульсов  $\Delta p$  относительно  $p_0$  очень мал, то есть  $\Delta p v_0 \ll \hbar \omega_s$ . В результате получим выражения для возмущенных концентраций:

$$n^{(2)} = 2 \frac{\Omega k_0 n_0}{(k_0^2 + \chi^2)^2 v_0} \left[ (k_0^2 + \chi^2) \sin \left( \alpha + \frac{\omega_s}{v_0} y \right) - \frac{\omega_s}{v_0} \frac{k_0^2 - \chi^2}{k_0^2 + \chi^2} \cos \left( \alpha + \frac{\omega_s}{v_0} y \right) \right], \quad (17)$$

$$n^{(3)} = 4 \frac{\chi^2 \Omega k_0 n_0}{(k_0^2 + \chi^2)^2 v_0} [(k_0^2 + \chi^2) \sin \left( \alpha - \frac{\omega_s}{v_0} y \right)].$$

Выражение для  $n^{(1)}$  мы не приводим, так как оно не вносит вклад в инкремент. Используя формулу (2) введем параметры:

$$Z_2 = 2 \frac{k_0^2 (k_0^2 - \chi^2)}{(k_0^2 + \chi^2)^2}; \quad Z_3 = 4 \frac{k_0^2 \chi^2}{(k_0^2 + \chi^2)^2}.$$

Тогда, полагая  $v_1 = v_2$ , получим выражение для инкремента:

$$\gamma = \frac{\omega_b^2 q v_0}{\Omega_s^2} \left( 1 + \frac{U_0^2 a^2}{\hbar^2 v_0^2} \right)^{-1}. \quad (18)$$

Здесь  $V_0 = 2U_0 a$ .

Если на границе сред не учитывать наличие барьера ( $U_0 \rightarrow 0$ ), то имеем

$\gamma = \frac{\omega_b^2 q v_0}{\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2}$ . Видно, что учет потенциального барьера приводит к уменьшению инкремента и при  $U_0 \rightarrow \infty$  он обращается в нуль. В случае, когда среды 1–2 не обладают частотной дисперсией, то инкремент приобретает вид:

$$\gamma = \frac{\omega_b^2 v_0}{\omega_b^2 d} \left( 1 + \frac{U_0^2 a^2}{\hbar^2 v_0^2} \right)^{-1}. \quad (19)$$

Таким образом, величина инкремента обратно пропорциональна времени пролета частицей области локализации 2D электронного газа.

**Количественные оценки.** Приведем численные оценки для гетероструктуры *AlGaAs–GaAs* с двумерным электронным газом на границе. Для типичных значений пучка:

$$\Omega_{Ss} = 10^{12} \text{ c}^{-1}, \quad d = 10^{-7} \text{ см}, \quad q_x = 10^2 \text{ см}^{-1}, \quad V_0 = 10^{12} \text{ c}^{-1}$$

инкремент достигает величины 0,1  $\Omega_{Ss}$ , что превосходит частоту столкновений носителей в полупроводниковой структуре. Таким образом, величина инкремента превосходит затухание плазмонов, обусловленное процессами рассеяния электронов, что означает возможность развития подобных неустойчивостей.

## Выводы

1. Исследованы механизмы взаимодействия потока заряженных частиц, наведенных внешним ЭМИ с собственными электромагнитными колебаниями двумерного электронного слоя на границе раздела сред. Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа колебаний системы пучок – двумерный слой, определен инкремент их неустойчивости.

2. Определены механизмы влияния границы на взаимодействие поверхностных колебаний и электронов при наличии потенциального барьера. В качестве объекта исследований рассмотрены поверхностные плазмоны.

3. Проведен сравнительный анализ неустойчивостей плазменных колебаний в условиях, когда взаимодействие волн и частиц происходит при наличии потенциального барьера и без него. Показано, что величина инкремента связана с изменением размеров области взаимодействия волн и частиц.

**Список литературы:** 1. *Мырова Л.О., Чепиженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. *Михайлов М.И., Рагузов Л.Д., Соколов С.А.* Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. *Стил М., Вюраль Б.* Взаимодействие волн в плазме твердого тела. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. *Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М.* Электромагнитные явления СВЧ-диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с. 5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

*Поступила в редакцию 15.04.2012.*

УДК 621.318

**В.И.КРАВЧЕНКО**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;

**Ф.В.ЛОСЕВ**, канд. техн. наук., науч. сотр., НТУ «ХПИ»;

**И.В.ЯКОВЕНКО**, д-р физ.-мат. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

## **ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ СТОРОННЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Показано, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на електровироби (ЕРВ) часто супроводжується виникненням струмів у провідних елементах ЕРВ і утворенням їх внутрішніх полів. Визначено механізми виникнення нестійкостей власних коливальних напівпровідникових надград, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього ЕМВ.

The influence of pulsed electromagnetic radiation on electric radio apparatus is often accompanied by currents arcing on inner current – conducting elements as well as by the distortion of their internal fields. The power losses of the flow of charged particles caused by such an interaction due to excitation of surface polaritons in the semiconductor structure have been determined.

Показано, что действие импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ) на электроизделия (ЭРИ) часто сопровождается возникновением токов в проводящих элементах ЭРИ и образованием их внутренних полей. Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях действия внешнего ЭМИ.

**Введение.** Все многообразие отказов, возникающих в РЭА как результат воздействия сторонних факторов, принято разделять на обратимые и необра-

тимые [1, 2]. Необратимые отказы характеризуются полной утратой работоспособности Р Э А. Они наступают в случае, когда изменение внутренних параметров аппаратуры превышает допустимые пределы (при воздействии внешнего ЭМИ необратимые отказы обычно возникают вследствие теплового пробоя комплектующих). Для обратимых отказов характерна временная утрата работоспособности, приводящая к искажению выходных характеристик.

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния ЭМИ на электрорадиоизделия относятся к области необратимых отказов. Моделирование механизмов взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональное назначение изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой), однако вопросы связанные с определением различного рода электромагнитных взаимодействий, протекающих непосредственно в комплектующих изделиях при воздействии ЭМИ остаются открытыми.

Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в этой области исследований обратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике.

**Основные результаты.** В предыдущих было исследовано бесстолкновительное затухание поверхностных плазмонов на основе дисперсионного уравнения. Мы показали, что затухание колебаний вызвано преобразованием поля поверхностного плазмона в волны Ван-Кампена. Как уже отмечалось ранее взаимодействие поверхностных плазмонов и электронов можно представить как процесс столкновений частиц и характеризовать интегралом столкновений в кинетических уравнениях для бозонов и фермионов. Подобным образом описывается механизм рассеяния электронов на фононах в проводящих твердых телах [116]. В настоящем параграфе исследуются механизмы затухания поверхностных колебаний, когда их взаимодействие с электронами проводимости носит характер столкновений.

Кинетическое уравнение для поверхностных плазмонов имеет вид:

$$\frac{\partial N_q}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum |W_{k_1 q k_2}|^2 \delta(E_1 - E_2 - \hbar \omega_q) [(N_q + 1)n_{k_1} (1 - n_{k_2}) - N_q n_{k_2} (1 - n_{k_1})], \quad (1)$$

где  $N_q$  – число поверхностных плазмонов в состоянии  $q$ ;  $n_{k_{1,2}}$  – число электронов в состояниях  $k_{1,2}$ ;  $E_{1,2} = \frac{\hbar^2 k_{1,2}^2}{2m}$  – закон дисперсии электронов;  $W_{k_1 q k_2}$  –

матричный элемент, характеризующий вероятность перехода электронов между состояниями  $k_1 \rightarrow k_2$ . Первый член правой части уравнения описывает процесс спонтанного и индуцированного излучения поверхностных плазмонов при переходе электронов из состояния  $k_1$  в состояние  $k_2$ ; второй – процессы поглощения плазмонов при обратных переходах. В левой части уравнения от-

сутствует член  $v_p \frac{\partial N_q}{\partial \vec{r}}$ , поскольку предполагается, что плазмоны не обладают дисперсией и их групповая скорость равна нулю. Особенность кинетического уравнения заключается в том, что закон сохранения импульса плазмонов и электронов выполняется только в направлении параллельном границе раздела сред, поскольку пространство вдоль оси  $OY$  неоднородно:

$$k_{1x} = k_{x2} + q_x; \quad k_{1z} = k_{z2} + q_z.$$

Предполагается, что плазменная среда (среда 1) занимает область пространства  $0 \leq y \leq L$   $\left( \varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right)$ . Границы  $y = 0$ ;  $y = L$  являются идеально отражающими, а области  $y < 0$ ;  $y > L$  занимает диэлектрик (вакуум)  $\varepsilon_2 = \varepsilon_d$ . Глубина проникновения поля плазмона остается малой по сравнению с  $L$ , то есть поля локализованы на границах  $y = 0$ ;  $y = L$  независимо друг от друга. Мы рассмотрим взаимодействие электронов и плазмонов вблизи границы  $y = 0$ .

Выражение для гамильтониана взаимодействия электронов с плазмонами, определяющее матричный элемент  $W_{k_1 q k_2}$ , имеет вид:

$$\hat{H}^{(int)} = -\frac{1}{c} \int \hat{j}(r) \hat{A}(r) dr. \quad (2)$$

Здесь  $A$  – вектор-потенциал (с калибровкой  $div \vec{A} = 0$ ;  $\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ ).

Он выражается через операторы рождения и уничтожения плазмонов (соответственно:  $\hat{a}_q^{(+)}(t) = \hat{a}_q \exp(i\omega t)$ ;  $\hat{a}_q(t) = \hat{a}_q \exp(-i\omega t)$ ) следующим образом:

$$A_\alpha(\vec{r}, t) = \sum_q A_\alpha(\vec{q}) \vec{e}_\alpha e^{i\vec{q}\vec{r}} [\hat{a}_q(t) + \hat{a}_{-q}^{(+)}(t)];$$

$$e_{1x} = e_{2x} = \frac{q_x}{q\sqrt{2}}; \quad e_{1y} = -e_{2y} = \frac{i}{\sqrt{2}}; \quad e_{1z} = e_{2z} = \frac{q_z}{q\sqrt{2}}; \quad q = \sqrt{q_x^2 + q_z^2};$$

$$\omega_{-q} = \omega_q = \omega; \quad q_y = -iq, \quad y < 0; \quad q_y = iq, \quad y > 0. \quad (3)$$

Величина  $A_q$  находится в результате квантования энергии электромагнитного поля поверхностного плазмона

$$\hat{H}^{(em)} = \frac{\omega^2}{8\pi c^2} \int [\hat{A}(\omega, r)]^2 \frac{d}{d\omega} (\omega \varepsilon(\omega)) d\vec{r}, \quad (4)$$

где интегрирование проводится по всей области локализации поверхностного плазмона. Подставляя в (4)  $[\hat{A}(\omega, r)]^2$ , приравнявая

$$H^{(em)} = \sum \frac{\hbar \omega_q}{2} [\hat{a}_q \hat{a}_q^+ + \hat{a}_q^+ \hat{a}_q], \text{ получим } A_q = \left( \frac{4\pi e^2 \hbar q c^2}{S \omega_q (\varepsilon_o + \varepsilon_d)} \right)^{1/2}, \text{ где } S - \text{ площадь}$$

поверхности образца.

Оператор плотности электронного тока имеет вид:

$$\begin{aligned}\bar{j} &= \frac{e\hbar}{2im_0} [\widehat{\Psi}^+ \widehat{\nabla} \widehat{\Psi} - \widehat{\Psi} \widehat{\nabla} \widehat{\Psi}^+]; \\ \widehat{\Psi}^+ &= \frac{1}{\sqrt{V}} \sum \widehat{b}_k^+(t) \exp(-i(k_x x + k_z z)) \sin k_y y; \\ \widehat{\Psi} &= \frac{1}{\sqrt{V}} \sum \widehat{b}_k(t) \exp(i(k_x x + k_z z)) \sin k_y y; \\ V &= SL \quad ; k_y = \frac{\pi}{L} n; \quad n = 1, 2, 3, \dots\end{aligned}\tag{5}$$

где  $b_k^{(+)}(t) = b_k^{(+)} e^{\frac{iE_k t}{\hbar}}$ ;  $b_k(t) = b_k e^{-\frac{iE_k t}{\hbar}}$  – операторы рождения и уничтожения электронов с волновым вектором  $\vec{k}$ .

Проведя в выражении (2) интегрирование, получим:

$$H^{(es)} = \sum_{k_1 q k_2} W_{k_1 q k_2} b_{k_1}(t) (a_q(t) + a_{-q}^+(t)) b_{k_2}^+(t),\tag{6}$$

где

$$\begin{aligned}W_{\vec{k}_1 \vec{q} \vec{k}_2} &= \frac{2k_{1y} k_{2y} (k_1^2 - k_2^2) W_0 q_x}{[q^2 + (k_{2y} - k_{1y})^2][q^2 + (k_{2y} - k_{1y})^2] q_x}; \\ W_0 &= \left( \frac{2\pi e^2 q_x \hbar^3}{m_0^2 L_y^2 S \omega_q (\varepsilon_0 + \varepsilon_d)} \right)^{1/2}.\end{aligned}$$

Видно, что матричный элемент обладает следующими свойствами:

$$W_{\vec{k}_1 \vec{q} \vec{k}_2} = -W_{\vec{k}_2 \vec{q} \vec{k}_1} = W_{\vec{k}_1 - \vec{q} \vec{k}_2}.$$

Учитывая закон сохранения энергии  $E_2 = E_1 - \hbar \omega_q$  и полагая  $q^2 \ll (k_{2y} - k_{1y})^2$ ;  $q \ll k_x$ ;  $q \ll k_z$  получим следующее выражение для матричного элемента:

$$\left| W_{\vec{k}_1 \vec{q} \vec{k}_2} \right|^2 = W_0^2 \left( \frac{\hbar k_y^{(+)} k_y}{m \omega_q} \right)^2; \quad k_y^+ = \sqrt{k_y^2 + \frac{2m \omega_q}{\hbar}}.$$

Декремент колебаний  $\gamma = \frac{1}{2N_q} \frac{\partial N_q}{\partial t}$  определяется процессами индуцированного излучения и поглощения волн частицами:  $N_q \gg 1$ :

Переходя в кинетическом уравнении (1) от суммирования к интегрированию  $\left( \sum_{k_y} = \frac{L}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk_y \right)$  получим следующее выражение для декремента.

$$\gamma = \frac{W_0^2 VL}{4\pi^3 m\hbar\omega_q^2} \int_{k_y > 0} dk k_y^+ k_y^2 (n_{k^{(+)}} - n_k). \quad (7)$$

Рассмотрим случай максвелловского распределения электронов:

$$n_k = n_0 \frac{(2\pi\hbar)^3}{(2\pi mT)^{3/2}} \exp\left(-\frac{\hbar^2 k^2}{2mT}\right).$$

Подставляя значения  $W_0$ ;  $n_k$  в формулу (7) и используя закон дисперсии поверхностных плазмонов  $\omega_q^2 = \frac{\omega_0^2}{\varepsilon_0 + \varepsilon_d}$  получим:

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\pi}} q_x v_T \left(\frac{T}{\hbar\omega}\right) \left(\exp\left(-\frac{\hbar\omega}{T}\right) - 1\right) \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \sqrt{x^2 + \frac{\hbar\omega}{T}} \exp(-x^2) dx. \quad (8)$$

Легко убедиться, что формула (7) в предельных случаях дает те же значения декремента, что и выражения (8).

В случае вырожденного электронного газа разность  $n_{k^+} - n_k = n_k(\varepsilon_F + \hbar\omega) - n_k(\varepsilon_F)$  при  $\varepsilon_F \gg \hbar\omega$  можно представить в виде  $\frac{\partial n_k}{\partial \varepsilon_F} \hbar\omega$ , где  $\frac{\partial n_k}{\partial \varepsilon_F} = n_k \delta(\varepsilon - \varepsilon_F)$ ;  $n_k = 1$ . В результате интегрирования (7) получим снова выражение) для  $\gamma$  в случае зеркального отражения электронов от границы.

Таким образом, представление о взаимодействии поверхностных плазмонов и электронов как о столкновительном процессе приводит к тем же результатам, что и метод дисперсионных соотношений. Кроме того, использование модели однородной плазмы является правомочным не только в классическом, но и в квантовом приближении.

Уравнение (1) исследовать механизмы спонтанного излучения частиц, когда  $N_q \ll 1$ . Рассмотрим излучение, создаваемое одной частицей  $n_k = \delta_{kk_0}$ , движущейся со скоростью  $v_0$ . В этом случае из уравнения (1) следует при  $q_x \ll kx$ ;  $q_z \ll k_z$ :

$$\frac{\partial N_{\bar{q}}}{\partial t} = \frac{4mL}{\hbar^3} \int_0^{\infty} |W_{k_0, ky}|^2 \delta\left(k_0^2 - k_y^2 - \frac{2m\omega_q}{\hbar}\right) dk_y. \quad (9)$$

Принимая во внимание условие:  $k_0^2 \gg \frac{2m\omega_q}{\hbar}$ , определим мощность спонтанного излучения электрона:

$$\hbar\omega_q \frac{\partial N_{\bar{q}}}{\partial t} = \frac{4\pi e^2 q v_0^3}{V\omega_0^2}. \quad (10)$$

Если число электронов в состоянии « $k_0$ » равно  $n_{k_0}$  то правую часть необходимо умножить на эту величину. Сравним мощность излучения с величиной потерь энергии частицы при ее отражении от границы раздела сред.

Поля, создаваемые частицей, будем описывать следующей системой

уравнений:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E}(\vec{r}, t) &= 0; \quad \operatorname{div} \vec{D} = 4\pi e \delta(x) [\delta(y - v_0 t) + \delta(y + v_0 t)] \delta(z); \\ \vec{D}(\vec{r}, t) &= \int_{-\infty}^t \varepsilon(t - t') \vec{E}(\vec{r}, t') dt', \quad y > 0; \\ \operatorname{rot} \vec{E}(\vec{r}, t) &= 0; \quad \operatorname{div} \vec{D} = 0; \\ \vec{D}(\vec{r}, t) &= \varepsilon_d \vec{E}(\vec{r}, t), \quad y < 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Фурье-компоненты поля частицы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \sum_{q_x, q_z} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}(\omega, \vec{q}, y) e^{i(\vec{q}\vec{r} - \omega t)} d\omega; \quad q = \sqrt{q_x^2 + q_z^2}, \\ E_x(\omega, \vec{q}, y) &= -\frac{ieq_x v_0 \cos \frac{\omega}{v_0} y}{\pi^2 \varepsilon(\omega) S(\omega^2 + q^2 v_0^2)}, \\ E_y(\omega, \vec{q}, y) &= -\frac{ie\omega \sin \frac{\omega}{v_0} y}{\pi^2 \varepsilon(\omega) S(\omega^2 + q^2 v_0^2)}; \\ \varepsilon(\omega) &= \int_0^{\infty} \varepsilon(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau, \end{aligned} \quad (12)$$

В дальнейшем  $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}$ ;  $\omega^2 \gg q^2 v_0^2$ . К этим полям необходимо добавить свободные поля, представляющие собой решения однородных уравнений (11) в средах «1» - «2»:

$$\begin{aligned} E_x(\omega, \vec{q}, y) &= A_1 e^{-qy}, \quad E_y(\omega, \vec{q}, y) = i \frac{q}{q_x} A_1 e^{-qy}, \quad y > 0; \\ E_x(\omega, \vec{q}, y) &= A_2 e^{qy}, \quad E_y(\omega, \vec{q}, y) = -i \frac{q}{q_x} A_2 e^{qy}, \quad y < 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Из граничных условий находим:

$$A_1 = \frac{ieq_x v_0}{\pi^2 \varepsilon(\omega)} \frac{\varepsilon_d}{(\varepsilon(\omega) + \varepsilon_d)}; \quad A_2 = -\frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon_d} A_1. \quad (14)$$

Нормальная составляющая электрического поля в среде «1» приобретает вид:

$$\begin{aligned} \vec{E}_y(\vec{r}, t) &= -\frac{8\pi e v_0}{S(\varepsilon(\omega) + \varepsilon_d)} \sum_{q_x, q_z} \frac{q}{\omega_q} e^{i\vec{q}\vec{r}} \sin \omega t, \quad t > 0; \\ \vec{E}_y(\vec{r}, t) &= 0, \quad t < 0. \end{aligned} \quad (15)$$

При интегрировании по  $d\omega$  учитывалась частота столкновений  $v \ll \omega$  для выбора правильного обхода полюсов:  $\omega = -\frac{iv}{2} \pm \omega_q$ .

Потери энергии частицы на возбуждение поверхностного плазмона в единицу времени  $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$  определяются из уравнения движения:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = ev_0 E_y. \quad (16)$$

В эту формулу следует подставить значение поля (15) в точке нахождения частицы  $x = 0$ ;  $y = v_0$ ;  $z = 0$ . Далее необходимо усреднить выражение для потерь энергии по времени пролета частицей области взаимодействия с волной в прямом и обратном направлениях:  $\tau = \frac{2L}{v_0}$ . Тогда средние потери энергии частицы в единицу времени на возбуждение  $q$ -гармоники поля плазмона принимают вид:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\hbar \omega_q \frac{\partial N_{\bar{q}}}{\partial t}. \quad (17)$$

Таким образом, потери энергии частицы (спонтанное излучение поверхностного плазмона) возникают в результате преобразования падающей на границу волны Ван-Кампена в поле плазмона. Зная выражение для матричного элемента (6) можно оценить интеграл столкновений электронов с поверхностными плазмонами:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{\bar{k}_1}}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum |W_{k_1 q k_2}|^2 \{ & \delta(E_1 - E_2 - \hbar \omega_q) [(N_{\bar{q}} + 1) n_{\bar{k}_1} (1 - n_{\bar{k}_2}) - \\ & - N_{\bar{q}} n_{\bar{k}_1} (1 - n_{\bar{k}_2})] + \delta(E_1 - E_2 + \hbar \omega_q) [(N_{\bar{q}} n_{\bar{k}_1} (1 - n_{\bar{k}_2}) - (N_{\bar{q}} + 1) n_{\bar{k}_2} (1 - n_{\bar{k}_1}))]. \end{aligned} \quad (18)$$

Из (18) можно найти изменение числа электронов  $n_{k_1} = n_{k_0} \delta_{i_1 k_0}$  в состоянии  $k_0$  при их переходе в состояние  $k$  в результате спонтанного излучения поверхностных плазмонов ( $N_q \rightarrow 0$ ). Выполняя интегрирование в выражении (18) получим:

$$\frac{\partial n_{k_0}}{\partial t} = -n_{k_0} \frac{4\pi e^2 q v_0^3}{V \omega_0^2 \hbar \omega_q}; \quad \frac{\partial n_k}{\partial t} = -\frac{\partial n_{k_0}}{\partial t}. \quad (19)$$

Потери энергии электрона при этом при переходе равны:

$$E_0 \frac{\partial n_{k_0}}{\partial t} + E \frac{\partial n_k}{\partial t} = (E_0 - E) \frac{\partial n_{k_0}}{\partial t};$$

где:

$$E_0 - E = \hbar \omega_q; \quad \frac{\partial n_{k_0}}{\partial t} = -\frac{\partial N_q}{\partial t}.$$

## Выводы

1. Определены кинетические механизмы затухания поверхностных плазмонов на границе полупроводник – диэлектрик, основанные на представлениях о волнах Ван-Кампена. Показано, что затухание колебаний такого рода

связано с тем, что колебания возбуждают на границе раздела сред волны Ван-Кампена, которые модулируются полем поверхностной волны и уносят энергию поля вглубь среды.

2. Использование понятия волны Ван-Кампена при описании механизмов бесстолкновительного затухания поверхностных колебаний позволяет учитывать влияние свойств границы на взаимодействие волн и частиц. В частности, эта модель позволяет определять выражения для декрементов поверхностных плазмонов в условиях диффузного отражения электронов от границы раздела сред.

3. Показано, что на границе полупроводник-пьезоэлектрик возникает дополнительный механизм затухания поверхностных плазменных колебаний, связанный с возбуждением электроакустических волн. Получены также выражения для декрементов бесстолкновительного затухания поверхностных электроакустических волн на границе полупроводник-пьезоэлектрик в условиях зеркального или диффузного отражения электронов от границы.

4. Изучены механизмы бесстолкновительного затухания поверхностных плазмонов в условиях, когда температура носителей проводящих твердых тел много меньше энергии плазмона (квантовое приближение). Получены выражения для декрементов поверхностных плазмонов при наличии бесконечно высокого и бесконечно малого потенциального барьера на границе раздела сред.

5. Исследованы процессы бесстолкновительного затухания поверхностных колебаний когда взаимодействие волн и частиц носит характер случайных столкновений и описывается методом вторичного квантования системы (представление чисел заполнения). Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа поверхностных плазмонов в результате их взаимодействия с электронами проводимости; приведены его решения, определяющие декремент колебаний и мощность спонтанного излучения частиц.

**Список литературы:** 1. *Мырова Л.О., Четиженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. *Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А.* Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. *Стил М., Вюраль Б.* Взаимодействие волн в плазме твердого тела. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. *Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М.* Электромагнитные явления СВЧ-диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. – К.: Наукова думка, 1991.– 216 с. 5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

*Поступила в редколлегию 21.03.2012.*

**В.М.КУПРИЕНКО**, д-р техн. наук, зав. отд., филиал ЦНИИ, Санкт-Петербург, Россия

## **НОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ СТЕРЖНЕВЫХ МОЛНИЕОТВОДОВ**

У статті викладені результати аналізу розрахунку зони захисту й вибору параметрів стрижневих блискавководів за вимогами різних нормативних документів, а саме: РД 34.21.122-87; СО 153-343.21.122-2003; МЭК 62305-2003; ВСП 22-02-07/МО РФ, які обґрунтовують необхідність розробки уточненої методики розрахунку та вибору параметрів блискавкозахисних пристроїв, наприклад з використанням кута захисту  $\alpha$ .

The article presents the analysis results for calculating the protection zone and selecting the lightning rod parameters due to the requirements of different Russian and foreign Norms and Standards. These results substantiate the necessity to develop specified procedure for design and selection of the lightning rod parameters, for example, with the use of protection angle  $\alpha$ .

В статье изложены результаты анализа расчета зоны защиты и выбора параметров стержневых молниеотводов по требованиям различных нормативных документов, а именно: РД 34.21.122-87; СО 153-343.21.122-2003; МЭК 62305-2003; ВСП 22-02-07/МО РФ, обосновывающие необходимость разработки уточненной методики расчета и выбора параметров молниезащитных устройств, например с использованием угла защиты  $\alpha$ .

Взросшие требования к защите объектов различного назначения от прямого удара молнии (ПУМ) и ее вторичных проявлений, привели к необходимости критической оценки действующих отечественных и зарубежных нормативных документов, регламентирующих проектирование молниезащиты с заданным уровнем надежности [1,2,3,4]. При всем различии глубины проработки нормативных документов их основу составляет методика расчета и выбора параметров стержневых и тросовых молниеотводов, обеспечивающих требуемую надежность молниезащиты. Базовым элементом различных методик является зона защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой  $h$ , которая представляет собой круговой конус (рис. 1), радиус  $r_x$  которого на высоте защищаемого объекта определяет надежность молниезащиты.

Сравнение параметров зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода при расчете по различным методикам, приведенным в отечественных и зарубежных документах, с целью обеспечения единства требований при проектировании молниезащитных устройств с заданным уровнем надежности молниезащиты, составляет основное содержание данной работы.

В Инструкции РД 34.21.122-87 [1], являющейся основным нормативным документом по молниезащите в РФ, параметры кругового конуса определяются по эмпирическим формулам для зоны А и зоны Б, отличающихся различной степенью надежности молниезащиты (зоне А соответствует степень надежности  $P_H = 0,99$ , зоне Б –  $P_H = 0,9$ ).

По методике МЭК 62305-2003 [2], параметры кругового конуса одиночного стержневого молниеотвода определяются методом катящейся сферы или

по соответствующему радиусу сферы углу защиты  $\alpha$ , который изменяется от  $\alpha = 23^\circ$  до  $\alpha = 80^\circ$  в зависимости от принимаемого уровня защиты. Для каждого из четырех установленных в МЭК уровней защиты задан набор минимальных и максимальных параметров тока молнии, характеризующих уровень защиты. Эффективность перехвата молнии (надежность молниезащиты  $P_H$ ) определяется минимальным током молнии  $I_{\min}$ , величина которого соответствует заданному уровню защиты. Вероятность не превышения минимального тока молнии для I уровня составляет  $P = 0,99$ , II уровня  $P = 0,97$ , III уровня  $P = 0,91$ , IV уровня  $P = 0,84$ . Каждый уровень защиты характеризуется также не превышением максимального тока молнии  $I_{\max}$ , величина которого определяет степень опасности воздействия на объект тока молнии или его вторичных проявлений.

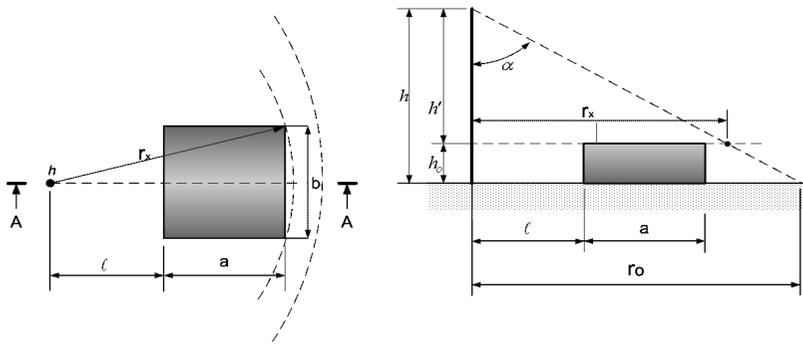


Рисунок 1 – Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода:

$h$  – высота стержневого молниеотвода;  $h_0(h_x)$  – высота объекта защиты;  
 $h'$  – высота молниеотвода возвышающегося над защищаемой поверхностью;  $r_0$  – радиус зоны защиты на уровне земли;  $r_x$  – радиус зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода на высоте защищаемого объекта;  
 $\alpha$  – угол защиты;  $l$  – расстояние от объекта до молниеотвода

В Инструкции по молниезащите СО 153-343.21.122-2003 [3], разработанной в развитие РД 34.21.122-87, параметры кругового конуса определяются также по эмпирическим формулам для трех значений надежности молниезащиты  $P_H$  равной; 0,999, 0,99 и 0,9. Дополнительно в инструкции, по аналогии с МЭК, введены четыре уровня защиты. Надежность защиты от ПУМ для I уровня составила  $P_H = 0,98$ , II уровня  $P_H = 0,95$ , III уровня  $P_H = 0,90$ , IV уровня  $P_H = 0,80$ . Таким образом, в СО 153 надежность молниезащиты характеризуется двумя различными вероятностными показателями, взаимосвязь между которыми не определена.

В ведомственных Нормх по молниезащите Минобороны России ВСП 22-02-07/МО РФ [4] зона защиты кругового конуса одиночного стержневого молниеотвода характеризуется так же, как и в МЭК углом защиты  $\alpha$ .

Значения угла защиты  $\alpha$ , приведенные в ВСП 22-02-07, получены в ре-

зультате обработки большого количества экспериментальных данных, устанавливающих зависимость надежности  $P_H$  зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода от величины угла защиты  $\alpha$  [5]. Угол защиты  $\alpha$  определен для трех значений надежности молниезащиты: по I категории надежность молниезащиты  $P_H = 0,99$ , II категории  $P_H = 0,95$ , III категории  $P_H = 0,9$ .

Принимая во внимание различие в походе к определению одинакового понятия, характеризующего зону защиты одиночного стержневого молниеотвода в приведенных выше нормативных документах, целесообразно выполнить сравнительную расчетную оценку параметров зоны защиты для объектов простейшей формы. Представленные ниже расчеты проведены для объекта в виде стержня высотой  $h_0 = 20$  м и здания в форме квадрата размерами  $10 \times 10$  и высотой  $h_0 = 20$  м, защита которых должна быть обеспечена одиночным отдельным стоящим стержневым молниеотводом.

На первом этапе по методике ВСП 22-02-2007 была определена высота  $h$  одиночного отдельно стоящего стержневого молниеотвода, круговой конус которого обеспечивает молниезащиту приведенных выше условных объектов для двух заданных значений надежности молниезащиты  $P_H = 0,9$  и  $0,99$ .

Для объекта в виде стержня при угле защиты  $\alpha = 35^\circ$  ( $P_H = 0,9$ ) и  $\alpha = 25^\circ$  ( $P_H = 0,99$ ) [4], определялась эффективная высота молниеотвода  $h' = r_x / \operatorname{tg} \alpha$ , а затем и высота молниеотвода  $h = h' + h_0$  (см. рис. 1)

Для объекта в форме квадрата при угле защиты  $\alpha = 46^\circ$  ( $P_H = 0,9$ ) и  $\alpha = 30^\circ$  ( $P_H = 0,99$ ) [4] аналогичным образом определялись  $h' = r_x / \operatorname{tg} \alpha$ , где  $r_x = \sqrt{(a+l)^2 + (b/2)^2}$  и высота молниеотвода  $h$ .

По остальным методикам для полученного значения высоты  $h$  стержневого молниеотвода и заданного расстояния  $l$  от объекта до молниеотвода по эмпирическим формулам рассчитывалась ширина  $r_x$  зоны защиты на высоте  $h_0$  объекта.

Для сравнения результатов расчета полученных по различным методикам использовалась величина угла защиты  $\alpha$ , который определялся по формуле  $\operatorname{tg} \alpha = r_x / h'$ , а также приведенная высота объекта  $h_x$ , который может быть размещена в зоне защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой  $h$  при одинаковом расстоянии  $r_x$  от молниеотвода до наиболее удаленной точки на приведенной высоте  $h_x$  объекта. Результаты расчета угла защиты  $\alpha$  и приведенной высоты объекта  $h_x$  даны в табл. 1.

Анализ результатов расчета, приведенных в табл. 1 показал, что наименьшие размеры зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода, определяемые величиной угла защиты  $\alpha$ , получены по методике СО и практически совпадают с данными, полученными по методике, приведенной в ВСП.

Значительно шире зона защиты получена при расчете по методикам, приведенным РД и МЭК. Например, приведенная расчетная высота объекта  $h_x$ , который может быть размещен в зоне защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой  $h = 27$  м (при  $P_H = 0,9$ ) составила: по методике ВСП –  $h_{x1} = h_0 = 20$  м; по методике СО –  $h_{x2} = 19,5$  м (меньше  $h_0$ ); по методике РД –

$h_{x3} = 21,8$  м (больше  $h_0$ ); по методике МЭК –  $h_{x4} = 24,8$  м (больше  $h_0$ ). При этом минимальный угол защиты  $\alpha$  получен при расчете по методикам СО ( $33,7^\circ$ ) и ВСП ( $35,5^\circ$ ), максимальный – по МЭК ( $66^\circ$ ), см. данные табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчета угла защиты  $\alpha$  и приведенной высоты объекта  $h_x$  при защите одиночным стержневым молниеотводом одинаковой высотой  $h$

$P_H$	Молниеотвод		ВСП 22-02-2007		СО 153-343. 21.122-2003		РД 34.21.122-87		МЭК 62305- 3	
	$h$ , м	$r_x$ , м	$\alpha$ , °	$h_{x1}$ , м	$\alpha$ , °	$h_{x2}$ , м	$\alpha$ , °	$h_{x3}$ , м	$\alpha$ , °	$h_{x4}$ , м
Объект в виде стержня высотой $h_0=20$ м										
0,9	27	5	35,5	20	33,7	19,5	49,8	21,8	66	24,8
0,99	30,7	5	25	20	24,2	19,6	30,2	22,1	45	25,7
Здание размерами 10x10 x 20м										
0,9	35,3	15,8	46	20	44,3	18,8	52	22,8	55	24,2
0,99	47,3	15,8	30	20	31,2	22	37,5	26,7	30	20

Следует отметить, что при надежности молниезащиты, равной  $P_H = 0,99$  размеры зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода для объекта прямоугольной формы размерами 10 x 10 x 20 м практически совпадают при расчете по трем методикам: ВСП, СО и МЭК. Это свидетельствует о достаточно корректном определении зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода с надежностью защиты от ПУМ, равной 0,99 для объекта прямоугольной формы по различным методикам.

При переходе от зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода к зоне защиты двойного стержневого молниеотвода (рис. 2) и далее к зоне защиты многократных стержневых молниеотводов, вводится понятие об увеличении зоны защиты, размеры которой определяются взаимным влиянием друг на друга двух и более стержневых (тросовых) молниеотводов. Совпадение радиуса  $r_x$  зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода, рассчитанного по разным методикам, предполагает одинаковую степень взаимного влияния и, как следствие, одинаковое расширение  $r_{cx}$  зоны защиты двойного стержневого молниеотвода. В методиках, изложенных в РД и СО, ширина зоны защиты  $r_{cx}$  двойного стержневого молниеотвода определяется по эмпирическим формулам при заданных размерах объекта  $a \times b \times h_0$ , высоте молниеотводов  $h$  и величине надежности молниезащиты  $P_H$ , а зона защиты многократных стержневых молниеотводов определяется наложением зон защиты двойных стержневых молниеотводов.

В стандарте МЭК зона защиты двух и более стержневых молниеотводов определяется методом обкатывания объекта сферой определенного радиуса, соответствующего заданному уровню защиты (так называемый электрогеометрический метод).

В ВСП расширение зоны защиты двух и более стержневых молниеотводов определяется по экспериментально полученному углу защиты  $\alpha$ , величина

которого зависит от уровня надежности молниезащиты  $P_H$ , размеров объекта, высоты молниеотводов и расстояния  $L$  между ними [5,6].

Ввиду различного подхода к определению зоны защиты двойного стержневого молниеотвода в приведенных выше нормативных документах, представляет интерес выполнить сравнительный расчет ширины  $r_{cx}$  зоны защиты для условного объекта простейшей формы. Расчет проведен для двух объектов размерами  $10 \times 10 \times 10$  м и  $20 \times 50 \times 10$  м, защита которых с надежностью  $P_H = 0,9$  и  $P_H = 0,99$  должна быть обеспечена двумя стержневыми молниеотводами одинаковой высоты  $h$ .

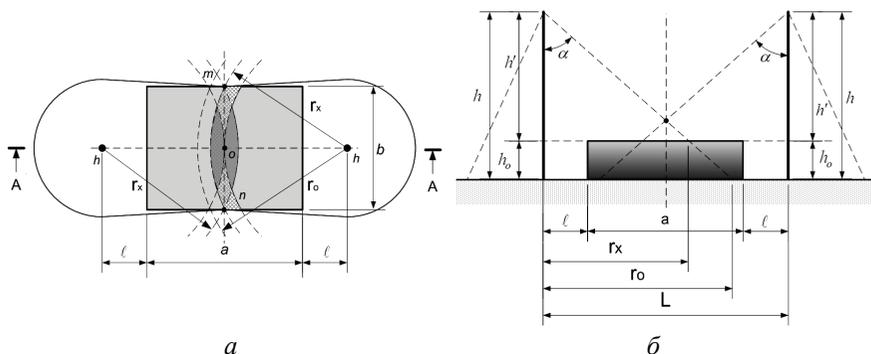


Рисунок 2 – Зона защиты двух стержневых молниеотводов:

$r_{cx}$  – ширина зоны защиты между точками  $om$  ( $on$ );  $h_0$  ( $h_x$ ) – высота объекта защиты  $L$  – расстояние между двумя стержневыми молниеотводами;  $r_x$  – радиус зоны защиты двух стержневых молниеотводов высотой  $h$  с учетом их взаимного влияния;  $h'$  – высота молниеотвода возвышающаяся над защищаемой поверхностью;  $\alpha$  – угол защиты;  $\ell$  – расстояние от объекта до молниеотвода

Для сравнения различных методик использовалась ширина зоны защиты  $r_{cx}$ , величина угла защиты  $\alpha$  и приведенная высота объекта  $h_x$ , который может быть размещен в зоне защиты двух стержневых молниеотвода высотой  $h$  при одинаковых размерах  $a \times b$  объекта и расстоянии  $\ell$  от молниеотводов до периметра объекта.

Высота  $h$  каждого из двух молниеотводов рассчитывалась по методике, приведенной в ВСП 22-02-2007 для надежности молниезащиты  $P_H = 0,9$  ( $\alpha = 56^\circ$  и  $\alpha = 58^\circ$  соответственно) [4] и  $P_H = 0,99$  ( $\alpha = 45^\circ$  и  $\alpha = 48^\circ$  соответственно):  $h = h_0 + r_x / \text{tg}\alpha$ , где  $r_x = \sqrt{(a/2 + \ell)^2 + (b/2)^2}$ .

По методикам РД и СО, при заданных размерах объекта  $a \times b \times h_0$ , одинаковой высоте молниеотводов  $h$  и расстоянии  $L$  между молниеотводами, по эмпирическим формулам рассчитывалась ширина  $r_{cx}$  зоны защиты на высоте  $h_0$  объекта. Затем, для сравнения результатов расчета по различным методикам, определялся угол защиты  $\alpha$ :  $\text{tg}\alpha = r_x / h'$ , где  $r_x = \sqrt{r_{cx}^2 + (a/2 + \ell)^2}$ .

По МЭК, при заданной высоте  $h$  молниеотводов, методом обкатывания определялась высота  $h_{x4}$  здания, которое может быть размещено в зоне защиты двух стержневых молниеотводов. Для здания высотой  $h_{x4}$  определялся угол защиты  $\alpha$  по схеме, приведенной на рис. 2.

Ширина зоны защиты  $r_{cx}$ , приведенная высота  $h_x$  здания, которое может быть размещено в зоне защиты двух стержневых молниеотводов, рассчитанные по различным методикам, а также получаемый при приведенной высоте  $h_x$  здания угол защиты  $\alpha$ , приведены в табл. 2.

Анализ результатов расчета, приведенных в табл. 2, показал, что ширина  $r_{cx}$  зоны защиты двойного стержневого молниеотвода, определенная по разным методикам, имеет существенные различия притом, что физически этого быть не может.

При учете взаимного влияния молниеотводов наименьшие размеры имеет зона защиты двойного стержневого молниеотвода, определенная по методике ВСП (см. данные табл. 2).

Таблица 2 – Результаты расчета ширины зоны защиты  $r_{cx}$ , приведенной высоты здания  $h_x$  и соответствующего ей угла защиты  $\alpha$  двойного стержневого молниеотвода

$P_H$	Молниеотводы		ВСП 22-02-2007			СО 153-343. 21.122-2003			РД 34.21.122-87			МЭК 62305-3		
	$h, м$	$r_x, м$	$r_{cx}$	$\alpha, ^\circ$	$h_0$	$r_{cx}$	$\alpha, ^\circ$	$h_{x1}$	$r_{cx}$	$\alpha, ^\circ$	$h_{x2}$	R	$\alpha, ^\circ$	$h_{x3}$
Объект молниезащиты здание 10 x 10 x 10 м. Расстояние между молниеотводами L = 20 м														
0,9	17,6	11,2	5	56	10	14,2	66,4	12,3	9,8	61,5	11,2	45	84	16,5
0,99	21,2	11,2	5	45	10	10,3	54,6	13,2	10	51,2	12,2	20	76	18,5
Объект здание 20 x 50 x 10 м. Расстояние между молниеотводами L = 60 м														
0,9	30	31,6	10	58*	10	18,6	60,8	12,3	25,3	63,3	14,1	45	71	18,6
0,99	38,5	31,6	10	48*	10	22,4	53	14,4	25,7	54,7	16	защиты нет		

Примечание: \* – величина угла защиты  $\alpha$  получена с учетом геометрической формы объекта [6]; R – радиус сферы обкатывания по МЭК

При расчете по методикам СО, РД ширина зоны защиты  $r_{cx}$  для одинаковой высоты объекта  $h_0 = 10$  м существенно увеличивается по сравнению с шириной зоны защиты  $r_{cx}$ , определенной по методике ВСП. А приведенная высота  $h_x$  объекта, который может быть размещен в зоне защиты двойного стержневого молниеотвода, определенная по методикам СО, РД и МЭК, значительно больше, чем базовая высота  $h_0$  защищаемого объекта (см. данные табл. 2). Причем изменение приведенной высоты объекта  $h_x$ , при ее определении по методикам СО и РД при различных значениях надежности  $P_H$ , не имеет выраженной закономерности. Например, как следует из данных, приведенных в табл. 2, высота  $h_{x1}$ , определенная по методике СО больше, чем  $h_{x2}$  определенная по методике РД для объекта размерами 10 x 10 x 10 м, а для объекта размерами 20 x 50 x 10 м – наоборот.

Зона защиты двойного стержневого молниеотвода для объекта высотой  $h_0 = 10$  м, рассчитанная по методике МЭК намного шире, чем по другим методикам, о чем свидетельствует величина угла защиты  $\alpha$ , приведенная в табл. 2.

Из данных, приведенных в табл. 2 видно, что ширина зоны защиты  $r_{cx}$  объекта высотой  $h_0 = 10$  м защищенного двумя стержневыми молниеотводами одинаковой высоты  $h$ , определенная по разным методикам, отличается более чем в два раза.

Например, для здания размерами  $20 \times 50 \times 10$  м, при расстоянии между двумя стержневыми молниеотводами  $L = 60$  м и приведенной высоте объекта  $h_x$ , результаты расчета величины угла защиты  $\alpha$  по методикам ВСП, СО и РД различаются на 10-15 %.

При расчете по методике МЭК ( $P_H = 0,99$ , I уровень защиты,  $R = 20$  м) защита от ПУМ вообще отсутствует. Что является наиболее характерным примером противоречия между российскими методиками и методикой МЭК.

Результаты расчета, приведенных в табл. 2, показали явное увеличение ширины зоны защиты двойного стержневого молниеотвода, определенной по методикам СО, РД и МЭК по сравнению с расчетом по методике, основанной на результатах экспериментальных исследований. Так как в основу расчета зоны защиты многократных молниеотводов (4<sup>-х</sup>, 6<sup>-ти</sup> и т.д. стержневых) положена зона защиты двойного стержневого молниеотвода, то и ее размеры будут существенно завышены по сравнению с их реальными размерами при перехвате разряда с минимальным током молнии.

## **Выводы**

1. Расчет параметров зоны защиты двойного стержневого молниеотвода, выполненный по различным методикам, показал существенное различие полученных результатов по ширине зоны защиты  $r_{cx}$ .

2. Методики расчета предложенные в РД и СО неудобны для практического использования, так как определяют не параметры молниеотводов, а ширину зоны защиты  $r_{cx}$  в которой может быть размещен объект путем перебора высоты и расстановки молниеотводов. Ширина зоны защиты  $r_{cx}$  двойных стержневых молниеотводов (следовательно, и многократных молниеотводов), определяемая по данным методикам, представляется необоснованно завышена.

3. Методика расчета, предложенная в стандарте МЭК, основанная на так называемой «электрогеометрической модели», удобна в практическом использовании, но лишена физического смысла, вследствие чего, например меньшей высоте молниеотвода, возвышающейся над объектом, соответствует больший угол защиты  $\alpha$ , а, следовательно, и большая по ширине зона защиты.

4. Расчеты, выполненные по методике МЭК, показали во всех случаях существенное превышение зоны защиты одиночного и двойного стержневых молниеотводов по сравнению с их расчетом по другим методикам. В то же время защита объекта двумя стержневыми молниеотводами по методике МЭК при расстоянии между ними, превышающем радиус сферы обкатывания  $R$  отсутствует, что не подтверждается результатами расчета по другим методикам и имеющимися экспериментальными данными.

5. Методика расчета, предложенная в ВСП, позволяет непосредственно определять параметры молниезащитной системы с учетом требуемой надежности, геометрических размеров объекта и взаимного влияния многократных стержневых молниеотводов, расширяющего зону защиты одиночного стержневого молниеотвода. При определении высоты молниеотводов ширина зоны защиты  $r_{\text{ex}}$  жестко связана с размерами объекта и расстоянием  $r_x$  от молниеотводов до наиболее удаленной точки на высоте объекта  $h_x$ .

6. Результаты исследований, показали необходимость разработки единого подхода к расчету и выбору параметров молниеотводов. Представляется, что для этого целесообразно использовать угла защиты  $\alpha$ , определенный не по «электрогеометрической модели», а по результатам экспериментальных исследований с учетом взаимного влияния двойных и многократных стержневых молниеотводов.

**Список литературы:** 1. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений / Минэнерго СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 2. Стандарт по молниезащите МЭК 62305. – Ч.1-5. 3. СО 153-343.21.122-2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М.: МЭИ, 2004. 4. ВСП 22-02-07/МО РФ. Нормы по проектированию, устройству и эксплуатации молниезащиты объектов военной инфраструктуры. – М.: 2007. – 168 с. 5. *Куприенко В.М.* К вопросу о нормировании молниезащиты объектов военной инфраструктуры / Сб. докл. Второй Российской конф. по молниезащите. – М.: июнь, 2010. 6. *Куприенко В.М., Григорьев А.А., Деметриадес Г.И., Кадзов Г.Д.* Результаты крупномасштабных исследований поражаемости зданий и сооружений при их защите многократными стержневыми и тросовыми молниеотводами / Сб. докл. I Российской конф. по молниезащите. – М.: июнь, 2010.

*Поступила в редколлегию 12.04.2012.*

УДК 621.311

**В.М.КУПРИЕНКО**, д-р техн. наук, зав. отд., филиал ЦНИИ, Санкт-Петербург, Россия;

**Г.А.АКОМЕЛКОВ**, канд. техн. наук, зав. лаб., филиал ЦНИИ, Санкт-Петербург, Россия;

**Н.М.ОРЕХОВ**, вед. инж., филиал ЦНИИ, Санкт-Петербург, Россия;

**В.Н.РОМАНЦОВ**, вед. инж., филиал ЦНИИ, Санкт-Петербург, Россия

## **О ПРИМЕНЕНИИ ОТДЕЛИТЕЛЕЙ СОВМЕСТНО С ОПН ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ 6, 10КВ**

У роботі виконані дослідження пристроїв захисту від атмосферних перенапруг, які складаються з послідовно включеного ОПН і віддільника, виготовленого в КНР, на відповідність вимогам МЭК-60099-4. Досліджені питання надійності й безпеки роботи віддільників типу RBT і TLB при їх спільній роботі з ОПН при обмеженні стандартизованих випробувальних впливів. Дослідження проводилися у Випробувальному центрі електромагнітних і механічних впливів ВАТ «26 ЦНД».

In the paper, researches are carried out of atmospheric surges protection devices consisting of series-connected surge arresters and trap, made in China, to meet the requirements of IEC-60099-4. The issues of reliability and safety of the RBT- and TLB-type traps when they work together with ARF under the constraint of standardized testing impacts were considered. The studies were conducted in the Test Center of electromagnetic and mechanical effects of «26 CRI».

В работе выполнены исследования устройств защиты от атмосферных перенапряжений, состоящих из последовательно включенного ОПН и отделителя, изготовленного в КНР, на соответствие требованиям МЭК-60099-4. Исследованы вопросы надежности и безопасности работы отделителей типа RBT и TLB при их совместной работе с ОПН при ограничении стандартизированных испытательных воздействий. Исследования проводились в Испытательном центре электромагнитных и механических воздействий ОАО «26 ЦНИИ».

## **Введение**

Важной проблемой, связанной с повышением надежности систем электроэнергетики при их эксплуатации, является обеспечение защиты электрических сетей классов напряжения 6, 10кВ и электрооборудования станций и подстанций от грозовых и коммутационных перенапряжений.

Одной из основных причин аварий и отключений ВЛ–6,10кВ являются грозовые воздействия. Практически все перенапряжения от прямых ударов молний и значительная часть индуктированных перенапряжений приводят к перекрытиям изоляторов, с большой вероятностью переходящим в силовую дугу под воздействием напряжения промышленной частоты, что приводит к повреждению изоляторов, опор и проводов.

Для защиты линий электропередач от грозовых и коммутационных перенапряжений все более широкое применение находят ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) с последовательно установленными отделителями (дисконнекторами).

Предполагается, что при возникновении аварийной ситуации – в случае отказа работы ОПН из-за пробоя под воздействием грозовых или коммутационных перенапряжений, деградации или других причин, происходит увеличение тока промышленной частоты и возникновение короткого замыкания в линии. Для защиты ОПН разрушающего действия токов КЗ последовательно с ОПН устанавливаются так называемые отделители (дисконнекторы). Устанавливаемые или планируемые к применению на высоковольтных линиях России отделители преимущественно китайского производства (например, отделители типа RBT, TLB и др.). Возникает вопрос насколько надежны и безопасны отделители при эксплуатации в условиях внешних воздействий, определенных требованиями ГОСТ Р 52725 в том числе и в рабочем режиме?

## **1 Требования, предъявляемые к отделителям**

В ГОСТ Р 52725 нет указаний на применение отделителей как элемента ОПН. Поэтому при задании требований к отделителям будем опираться на рекомендации МЭК – 60099-4. Отделитель, по определению МЭК, предназначен для предотвращения возникновения устойчивого короткого замыкания в системе и визуальной индикации поврежденного разрядника. Повреждение легко может быть обнаружено обслуживающим персоналом, что упрощает эксплуа-

тацию линии.

В нормальном эксплуатационном режиме отделитель должен выдерживать все виды токов, которые протекают через ОПН: токи утечки, импульсные токи грозовых и коммутационных перенапряжений. По пропускной способности отделитель должен соответствовать классу выбранного ограничителя перенапряжений. Причем все это должно обеспечиваться на фоне приложенного рабочего напряжения. Из этого следует, что устройство защиты, состоящее из ОПН и отделителя должно обеспечивать:

- заданное время срабатывания отделителя при нормируемом токе промышленной частоты в соответствии с требованиями ТУ и (или) «Руководства по эксплуатации» изготовителя;
- соответствие классификационного напряжения устройства защиты для электрических сетей переменного тока 6, 10 кВ требованиям ГОСТ и (или) технических условий на изделие;
- соответствие остающихся напряжений при грозовых, коммутационных и быстро нарастающих импульсах тока устройства защиты для электрических сетей переменного тока 6, 10 кВ требованиям ГОСТ и (или) технических условий на изделие;
- пропускную способность устройства защиты для электрических сетей переменного тока 6-10 кВ при воздействии прямоугольных импульсов тока большой длительности соответствующей амплитуды;
- работоспособность при проведении рабочих испытаний устройств защиты для электрических сетей переменного тока напряжением 6-10 кВ.

В докладе представлены результаты исследований надежности и работоспособности устройств защиты для электрических сетей 6, 10 кВ, состоящих из ОПН и последовательно включенного с ним отделителя китайского производства типа RBT и TLB.

Основные технические характеристики отделителя типа RBT представлены в табл. 1. Внешний вид отделителей на рис. 1, 2.

Таблица 1 – Технические характеристики отделителя типа RBT

Вид воздействия	RBT-65/150	RBT-65/150	RBT-65/150
Импульсы прямоугольной формы 2мс, (А)	150	400	800
Большие импульсы форм 4/10 мкс, (кА)	65	65	100
Время срабатывания (с) при токе 1 А	4-6		

Схематично отделитель представляет собой пластмассовый корпус – 1 (см. рис. 3), внутри которого размещен резистивный нелинейный элемент – 2. Для защиты резистивного элемента от больших импульсных токов ему параллельно подключен защитный разрядник – 3. К резистивному элементу поджат с помощью пружины пиропатрон – 4.

При протекании через ОПН и отделитель токов, превышающих номинальные значения для ОПН, происходит разогрев резистивного элемента. В

результате под воздействием высокой температуры происходит подрыв пиропатрона и разрушение корпуса отделителя. Усилием пружины и порохового заряда заземляющий проводник отбрасывается с высокой скоростью и отключает ОПН от сети.



Рисунок 1 – Общий вид отделителей типа TLB

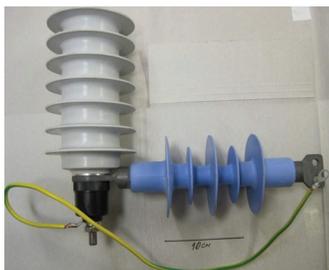


Рисунок 2 – Вид ОПН с отделителем типа RBT

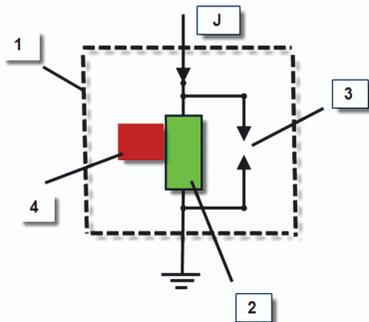


Рисунок 3 – Схема отделителя

## 2 Проверка времени срабатывания отделителя

К испытываемому отделителю, размещение которого на испытательной площадке показано на рис. 4, подключался источник промышленной частоты из состава стенда рабочих испытаний ВИС-2. После включения источника промышленной частоты через отделитель пропускался переменный ток, в результате чего происходило срабатывания отделителя (см. рис. 5).

Значение тока через отделитель и время срабатывания отделителя измерялись с помощью шунта сопротивлением 0,05 Ом и осциллографа. Осциллограмма тока через ОПН и отделитель представлены на рис. 6.

Результаты измерений времени срабатывания испытываемых отделителей представлены в табл. 2. Во всех экспериментах происходило отключение заземляющего проводника от ОПН. Измеренное значение времени срабатывания соответствовало заявленному изготовителем.

Кроме того в процессе испытаний контролировалась зона разлета элементов отделителя после его разрушения. Осмотр зоны проведения испытаний по-

казал, что отдельные элементы отделителя разлетались на расстояние от 2,5 м до 4,5 м, а видеосъемка показала горение нелинейного элемента отделителя в течение 5-6 с. Что недопустимо по требованиям безопасности.

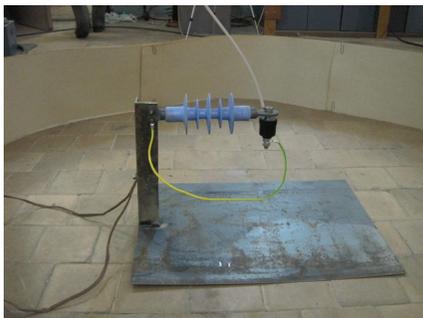


Рисунок 4 – Внешний вид размещения отделителя при испытаниях



Рисунок 5 – Внешний вид фрагментов сработавшего отделителя

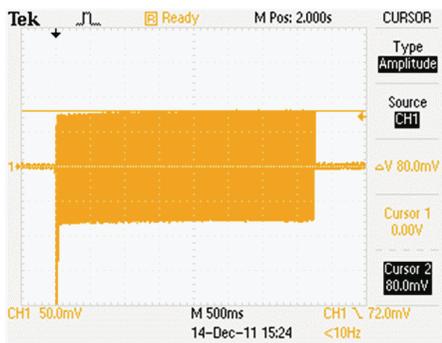


Рисунок 6 – Осциллограмма тока промышленной частоты,  $I_{дейст} = 1,13 \text{ A}$ ,  $t = 3,75 \text{ с}$

Таблица 2 – Время срабатывания отделителя RBT

№ образца	Величина тока, А	Время срабатывания, с
1	1,13	3,75
2	0,998	4,0
3	1,05	3,75
4	1,13	3,7
5	1,1	4,3

### 3 Проверка соответствия остающихся напряжений при грозовых, коммутационных и быстро

нарастающих импульсах тока устройства защиты для электрических сетей переменного тока 6,10кВ требованиям ГОСТ и (или) технических условий на изделие

Одним из основных параметров ОПН, характеризующих его защитные свойства является остающееся напряжение при нормируемых импульсных токах.

В связи с этим при проведении исследований проверялось влияние отделителя на значения остающихся напряжений на защитном устройстве (ЗУ) при грозовых, коммутационных и быстро нарастающих импульсах тока.

Измерения остающихся напряжений проводились в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52725-2007. Типовая схема проведения измерений остающихся напряжений представлена на рис. 7.

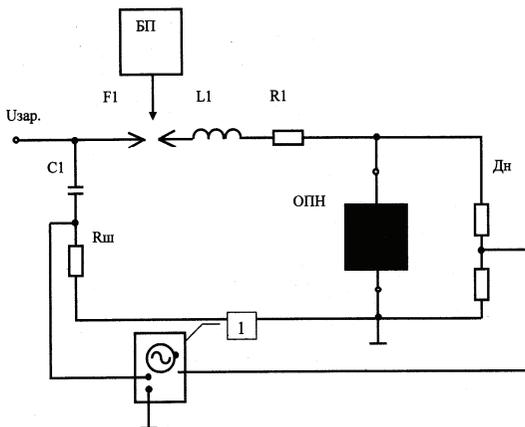


Рисунок 7 – Схема для измерения остающихся напряжений:

1 – осциллограф,  $R_{ш}$  – шунт сопротивлением  $1 \cdot 10^{-3}$  Ом, БП – блок поджига, F1 – управляемый разрядник, ДН – делитель напряжения, ДИН-25,  $K_d = 1000$ , C1 – емкость генератора, L1, R1 – формирующие элементы генераторов, ОПН – секция, варистор

**На первом этапе** испытаний, на защитном устройстве определялось остающееся напряжение при грозовом импульсе тока 8/20 мкс амплитудой 10 000 А.

К каждому УЗЭП прикладывался грозовой импульс тока 8/20мкс амплитудой  $10000 \text{ А} \pm 5 \%$ . Длительность фронта находилась в пределах 7÷9 мкс, а время до полуспада амплитуды импульса 18÷22 мкс. Время между приложением импульсов было достаточным для охлаждения образца до температуры окружающей среды.

**На втором этапе** проводились измерения остающихся напряжений при нормируемых импульсах тока 8/20 мкс, 30/60 мкс и 1/10 мкс. По результатам измерений проводился расчет масштабных коэффициентов как отношение остающегося напряжения при нормируемом импульсе тока к остающемуся напряжению при грозовой импульс тока 8/20 мкс амплитудой 10 кА.

Импульсы тока на секции подавались от генератора грозового импульса

тока – ГИТ 8/20, генератора коммутационного импульса – ГИТ 30/60 и генератора быстро нарастающего импульса тока – ГИТ 1/10. Генераторы входят в состав стенда рабочих испытаний ВИС-2.

Измерения остающихся напряжений проводились с помощью делителя напряжений и осциллографа, тока через секции – шунтом и осциллографом. Типовые осциллограммы импульсов тока представлены на рис. 8, 9.

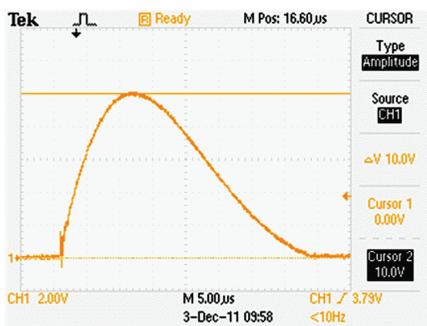


Рисунок 8 – Осциллограмма импульса тока 8/20 мкс ( $I_{max} = 10 \text{ кА}$ )

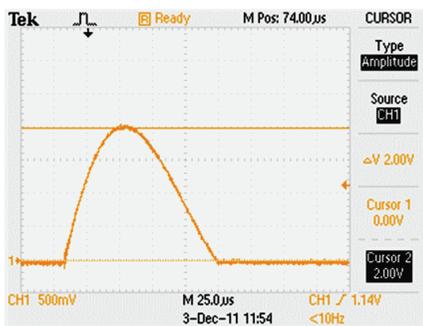


Рисунок 9 – Осциллограмма импульса тока 30/60 мкс ( $I_{max} = 2 \text{ кА}$ )

**На третьем этапе испытаний** производился расчет остающихся напряжений при нормируемых импульсах тока на защитном устройстве. Остающееся напряжение определялось как произведение остающегося напряжения при грозовом импульсе тока амплитудой 10кА, заданного в Технических условиях, на соответствующий масштабный коэффициент.

В табл. 3 и 4 приведены значения остающихся напряжений, рассчитанных по масштабным коэффициентам для защитного устройства с отделителем.

Таблица 3 – Остающиеся напряжения на ОПН пропускной способностью 680 А с отделителем типа РВТ при грозовых и быстронарастающих импульсах тока

Тип ограничителя	Остающиеся напряжения при нормированных импульсах тока										
	1/10мкс			8/20мкс							
	10 кА			5 кА		20 кА		10 кА			
	Расч	ТУ	С отд	Расч	ТУ	С отд	Расч	ТУ	С отд	ТУ	С отд
ОПН-6/680/7,6-5	25	25,0	29	22,4	22,5	24,9	27,4	27,4	31,4	24,3	27,98
ОПН-10/680/12,7-5	41,7	41,7	45,7	37,4	37,5	39,9	45,8	45,8	49,8	40,6	44,3

#### 4 Проверка пропускной способности отделителей и испытания отделителей в рабочем режиме в соответствии с требованиями МЭК-60099-4

В условиях эксплуатации через отделитель протекают те же токи, что и через ОПН. В связи с этим МЭК 60099-4 определяет следующие виды проверок, которые должен выдерживать отделитель:

- испытание импульсом тока большой длительности;
- проверка в рабочем режиме.

Таблица 4 – Остающиеся напряжения на ОПН пропускной способностью 680 А с отделителем типа RBT при коммутационных импульсах тока

Тип ограничителя	Остающиеся напряжения при нормированных импульсах тока 30/60мкс								
	250 А			500 А			1000 А		
	Расч.	ТУ	С отде-лит	Расч.	ТУ	С отде-лит	Расч.	ТУ	С отде-лит
ОПН-6/680/7,6-5	18	18,1	19,56	18,9	18,9	20,9	19,9	20,0	32,08
ОПН-10/680/12,7-5	30	30,2	31,56	31,5	31,5	33,5	33,3	33,5	35,68

### Проверка пропускной способности импульсами тока большой длительности

Испытания проводились в соответствии по методике п. 9.4 ГОСТ Р 52725. Проверка пропускной способности импульсами тока большой длительности проводилась путем подачи на секцию, состоящую из элемента ОПН и отделителя, 18 импульсов тока (6 серий по 3 импульса) большой длительностью амплитудой 680А от генератора ГИТ2000, входящего в состав ВИС-2. Схема генератора импульсов тока большой длительности представлена на рис. 10, типовая осциллограмма импульса тока большой длительности представлена на рис. 11.

Интервалы между импульсами в группе составляли от 50 до 60с. Между группами импульсов секции охлаждались до температуры окружающей среды. Измерения параметров импульсов тока проводились с помощью шунта и осциллографа.

### Результаты испытаний

Амплитуда воздействующих прямоугольных импульсов тока при проведении испытаний секции ОПН с отделителем типа RBT находилась в диапазоне от 696 А до 718 А. В процессе проведения испытаний на осциллограммах отсутствовали искажения формы кривой тока, свидетельствующие о наличии повреждений в образцах, не происходило срабатывания отделителей и отделители сохранили работоспособность после проведенных воздействий.

При проведении испытаний секции ОПН с отделителем типа TLB амплитуда воздействующих прямоугольных импульсов тока находилась в диапазоне от 600 А до 640 А. В процессе проведения испытаний на осциллограммах отсутствовали искажения формы кривой тока, свидетельствующие о наличии повреждений в образцах и не происходило срабатывания отделителей. Однако, результат проверки работоспособности отделителей типа TLB путем воздействия на них током промышленной частоты значением 21 А в течение 25 сек, показал их не работоспособность.

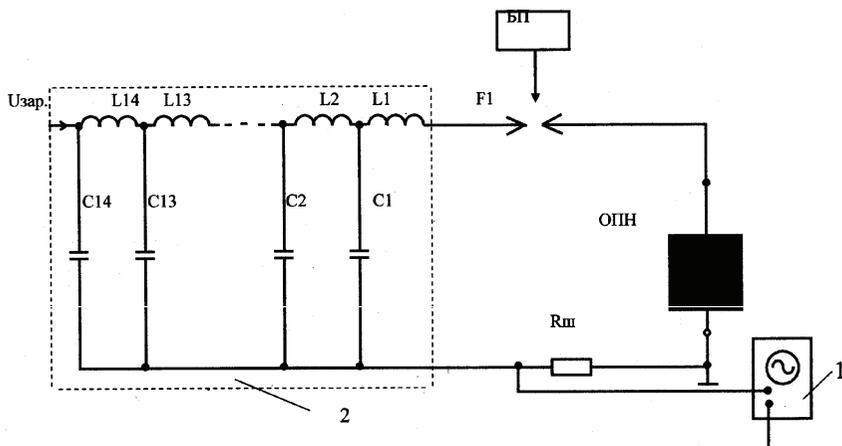


Рисунок 10 – Схема генератора импульсов тока большой длительности:  
 1 – осциллограф; 2 – формирующая линия; БП – блок поджига;  
 F1 – управляемый разрядник; ОПН – секция (варистор);  
 $R_{ш}$  – шунт, сопротивлением  $10^{-2}$  Ом



Рисунок 11 – Типовая осциллограмма импульса тока через варисторы ( $I_{МАКС} = 696$  А)

### Проверка в рабочем режиме

Проверка в рабочем режиме проводилась на трех секциях каждого типа отделителей, изготовленных в соответствии с требованиями п. 9.5 ГОСТ Р52725-2007 и МЭК - 60099-4.

Секции представляли собой пропорциональную часть корпуса ОПН, в которой размещен варистор. Последовательно с варистором подключался отделитель.

Рабочие испытания представляли собой комплекс следующих видов испытаний и измерений, которым подвергались секции ОПН с отделителем:

1. Начальные измерения (измерение остающегося напряжения на секциях при импульсном токе 8/20 мкс амплитудой 10 кА и определение наибольшего

длительно допустимого рабочего напряжения секций).

2. Подготовительные испытания, состоящие из:

- подготовительных испытаний двадцатью импульсами тока 8/20мкс с амплитудой 10 кА;
- испытаний двумя сильноточными импульсами 4/10 мкс амплитудой 100 кА.

3. Рабочие испытания.

4. Измерения остающегося напряжения на импульсном токе 8/20мкс амплитудой 10 кА после рабочих испытаний.

*Подготовительные испытания импульсами тока 8/20 мкс амплитудой 10 кА*

Три секции каждого типа отделителей подвергались воздействию двадцати импульсов тока 8/20мкс амплитудой 10 кА. К секциям на время испытаний подключался источник напряжения промышленной частоты.

Действующее значение напряжения источника промышленной частоты выставлялось равным  $U_{НРС}$ . Перед подачей грозового импульса тока на секцию напряжение промышленной частоты увеличивалось в 1,2 раза, а после приложения грозового импульса тока напряжение промышленной частоты снова понижалось до  $U_{НРС}$ .

В результате проведенных предварительных испытаний грозовыми импульсами тока 8/20 мкс с амплитудой 10кА не происходило срабатывания отделителей типа TLB и RBT, перекрытий или других видимых его повреждений. Во время испытаний так же не происходило пробоев, перекрытий и разрушений секций ОПН. Результат испытаний положительный.

*Испытания импульсами тока 4/10 мкс амплитудой 100 кА*

Секции подвергались воздействию двух импульсов тока 4/10 мкс амплитудой 100 кА. В интервале между импульсами образцы охлаждались до температуры окружающей среды. Импульсы тока подавались от генератора ГИТ-4/10 стенда рабочих испытаний ВИС-2.

Импульсы тока 4/10 мкс подавались одинаковой полярности с импульсами тока 8/20 мкс при подготовительных испытаниях.

Результаты измерений при воздействии импульсами тока 4/10 мкс представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Параметры воздействующего импульса тока

№ секции	Амплитуда первого импульса тока, кА	Амплитуда второго импульса тока, кА	Длительность фронта, мкс	Длительность импульса, мкс
1	100	100	4	10,5
2	100	100	4	10,5
3	101	100	4	10,5

В результате воздействия импульсами тока 4/10 мкс с амплитудой 100 кА на отделители типа RBT не происходило его срабатывание, перекрытие или

возникновение других видимых повреждений. Во время испытаний так же не происходило пробоев, перекрытий и разрушений секций. Результаты испытаний секции ОПН с отделителем типа RBT положительные.

В результате воздействия импульсами тока  $4/10$  мкс с амплитудой 100 кА на отделители типа TLB произошло не санкционированное срабатывание двух из трех образцов (образцы № 1 и № 3). Измерение сопротивления образца № 2 показало, что его величина равна нулю, то есть электроды отделителя закорочены.

Дальнейшие исследования проводились только для отделителей типа RBT.

*Рабочие испытания двумя импульсами тока большой длительности амплитудой 680А*

К секциям ОПН с отделителем, предварительно нагретым до температуры  $60 \pm 3$  °С, прикладывались два импульса тока большой длительности с амплитудой 680 А. Интервал между импульсами составлял не более 50-60 с. Импульсы, прикладываемые во время подготовительных испытаний, и импульсы тока большой длительности имели одинаковую полярность. Схема проведения испытаний представлена на рис. 12.

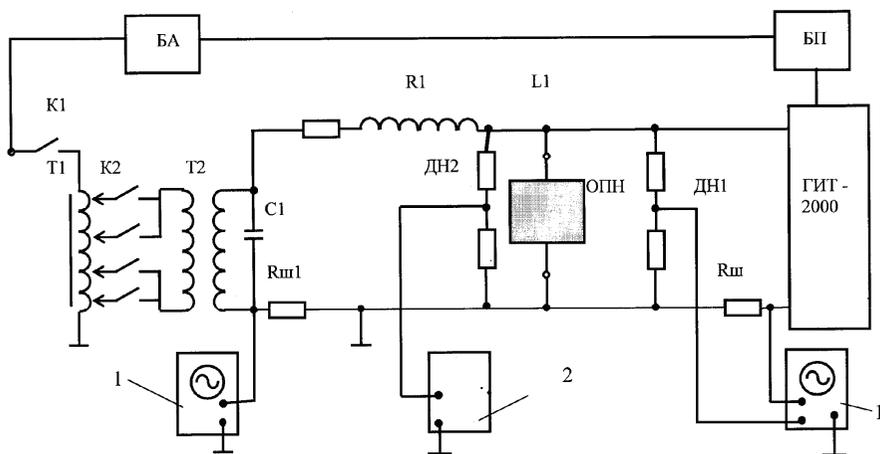


Рисунок 12 – Схема проведения рабочих испытаний:

Т1 – автотрансформатор; Т2 – повышающий трансформатор 220/7 кВ (10 кВ); С1 – корректирующая емкость; R1 – защитный резистор; L1 – защитная индуктивность (200 мкГн); ДН1 – делитель напряжения, ДИН-25,  $K_D = 1000$ ; Rш – шунт сопротивлением  $10^{-2}$  Ом; Rш1 – шунт сопротивлением 20 Ом; ДН2 – делитель напряжения, ДН-6,  $K_D = 10000$ ; ГИТ 2000 – генератор тока; ОПН – объект испытаний; 1 – осциллографы; 2 – вольтметр; БП – блок поджига; БА – блок автоматики

В результате воздействия первого импульса большой длительности с ам-

плитудой 696А произошло срабатывание отделителя типа RBT. При внешнем осмотре не было обнаружено пробоев, перекрытий и разрушений испытуемой секции ОПН.

В связи с полученными отрицательными результатами при испытании отделителя импульса большой длительности в рабочем режиме его дальнейшие испытания не проводилось.

### **Выводы**

1. Отделители типа TLB и RBT обеспечивают отключение заземляющего проводника ОПН в соответствии с его ампер-секундной характеристикой, заявленной изготовителем. В процессе срабатывания отделителей наблюдался разлет его элементов на расстояние до 4,5м. После срабатывания отделителя типа RBT наблюдалось горение нелинейного элемента в течение 5-6 секунд, что может привести к возникновению пожара.

2. Значения остающихся напряжений на ограничителе перенапряжений с последовательно включенным отделителем при нормированных импульсах тока превышали значения, заданные Техническими условиями на ОПН.

3. Пропускная способность отделителя типа RBT при воздействии импульсов тока большой длительности амплитудой 680А соответствует требованиям МЭК-60099-4 и Технических условий. Отделитель типа TLB не выдержал испытаний импульсами тока большой длительности амплитудой 600 А.

4. Отделитель типа TLB произвел не санкционированное срабатывание при приложении к ОПН импульса тока амплитудой 100 кА в процессе проведения рабочих испытаний.

5. Отделитель типа RBT произвел не санкционированное срабатывание в рабочем режиме при воздействии импульса тока большой длительности амплитудой 680 А.

6. Надежность и безопасность устройств защиты линий электропередачи напряжением 6,10кВ выполненных на основе последовательного включения ОПН и отделителей типа TLB и RBT не соответствует заявленным требованиям, требованиям ГОСТ 52725 и МЭК-60099-4.

*Поступила в редколлегию 05.04.2012.*

**В.М.КУПРИЕНКО**, д-р техн. наук, зав. отд., филиал ЦНИИ, Санкт-Петербург, Россия;

**Г.А.АКОМЕЛКОВ**, канд. техн. наук, зав. лаб., филиал ЦНИИ, Санкт-Петербург, Россия;

**Н.М.ОРЕХОВ**, вед. инж., филиал ЦНИИ, Санкт-Петербург, Россия;

**В.Н.РОМАНЦОВ**, вед. инж., филиал ЦНИИ, Санкт-Петербург, Россия

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ОТ АТМОСФЕРНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ (УЗАП) ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ 6, 10 КВ ПРИ ИМИТАЦИИ РАЗРЯДА МОЛНИИ В ПРОВОД**

У роботі виконані дослідження пристроїв захисту від атмосферних перенапруг типу УЗАП при дії грозових і комутаційних перенапруг. Обґрунтована схема проведення випробувань. Відпрацьована методика реєстрації параметрів розрядної напруги на випробовуваному об'єкті. Приведені результати дослідження пристроїв захисту від атмосферних перенапруг типу УЗАП встановлених на штатній металевій опорі з підвищенням на ізолюючій траверсі дротом марки СИП-3. В результаті досліджень отримані дані про фактичну захисну здатність УЗАП-О і УЗАП-К при дії грозових і комутаційних перенапруг.

In the paper, researches are carried out on the atmospheric surges protection devices such as UZAP when exposed to lightning and switching surges. The test scheme is justified. A technique is developed for recording parameters of the discharge voltages on a test object. The results of the study the atmospheric surges protection devices of the UZAP-type mounted on a standard metal pole with the wire CIP-3 hanging on an insulating traverse. The studies provided data on the actual protective ability of UZAP-O and UZAP-K and under the action of lightning and switching surges.

В работе выполнены исследования устройств защиты от атмосферных перенапряжений типа УЗАП при воздействии грозовых и коммутационных перенапряжений. Обоснована схема проведения испытаний. Отработана методика регистрации параметров разрядных напряжений на испытуемом объекте. Приведены результаты исследования устройств защиты от атмосферных перенапряжений типа УЗАП установленных на штатной металлической опоре с подвешенным на изолирующей траверсе проводом марки СИП-3. В результате исследований получены данные о фактической защитной способности УЗАП-О и УЗАП-К при воздействии грозовых и коммутационных перенапряжений.

### **Введение**

Важной проблемой, связанной с повышением надежности систем электроэнергетики при их эксплуатации, является обеспечение защиты электрических сетей классов напряжения 6, 10 кВ и электрооборудования станций и подстанций от грозовых и коммутационных перенапряжений.

Одной из основных причин аварий и нарушений питания на ВЛ–6,10 кВ являются грозовые воздействия. Практически все перенапряжения от прямых ударов молний и значительная часть индуктированных перенапряжений приводят к перекрытиям изоляторов, с большой вероятностью переходящим в силовую дугу под воздействием напряжения промышленной частоты, что приводит к повреждению изоляторов, опор и проводов.

В ООО «Спецавтоматикасервис» разработаны и внедрены на линиях электропередачи напряжением 6 и 10 кВ устройства защиты от перенапряжений нелинейные типа УЗАП с искровым разрядным промежутком.

На практике используется две модификации УЗАП отличающиеся между собой по конструкции и способу установки на изолирующей траверсе металлической опоры. Устройства защиты от атмосферных перенапряжений типа УЗАП-0 предназначены для установки на опорном изоляторе, а УЗАП-К на подвесном изоляторе ВЛ–6,10 кВ. Конструктивно УЗАП состоит из ограничителя перенапряжений нелинейного (ОПН) и внешнего искрового промежутка (ИП) один из электродов которого крепится на верхнем фланце ОПН, а другой на проводе ВЛ с помощью специального зажима (на ВЛ с изолированными проводами прокальвающий зажим). В качестве ограничителя перенапряжений используется ОПН в полимерном корпусе с характеристиками отвечающими требованиям технических условий и ГОСТ Р 52725.

В данной работе приводятся результаты испытаний по определению фактической защитной способности устройств защиты типа УЗАП электрооборудования сети переменного напряжения 6 и 10 кВ частотой 50 Гц при воздействии грозových и коммутационных перенапряжений.

### **Методика проведения испытаний фактической защитной способности УЗАП**

Определение фактической защитной способности УЗАП при воздействии грозových и коммутационных напряжений проводились на высоковольтном стенде филиала ОАО «26 ЦНИИ». В качестве источника импульсных перенапряжений использовался высоковольтный генератор ГИН 6000/960. Генератор формировал в проводе, моделирующем линию электропередачи, импульсы грозových и коммутационных перенапряжений как положительной, так и отрицательной полярности.

На открытой испытательной площадке был выполнен монтаж стальной опоры 09Г2С с изолирующей траверсой на 6(10) кВ и двумя пролетами изолированного провода типа СИП-3 длиной по 60м, моделирующего линию электропередачи. Противоположные от опоры концы провода крепились на диэлектрических растяхках. На изоляторы траверсы последовательно устанавливались защитные устройства типа УЗАП-0 и УЗАП-К. Высота подвеса УЗАП от земли до точки крепления провода не менее 7 м. Высоковольтный электрод подвешивался на высоте 6-9 м над изолированным проводом на расстоянии 5 м от опоры.

Схема проведения испытаний УЗАП грозovým и коммутационным импульсами напряжения приведена на рис. 1. Монтаж УЗАП-К на опоре и общий вид испытательной площадки показан на рис. 2, 3.

Измерение параметров напряжения грозového и коммутационного импульсов проводилось с помощью встроенного емкостного делителя напряжения ГИН и осциллографа типа Tektronix 2022В. В процессе проведения испытаний осуществлялись измерения и регистрация импульсных напряжений на выходе генератора и воздействующих на испытуемые защитные устройства.

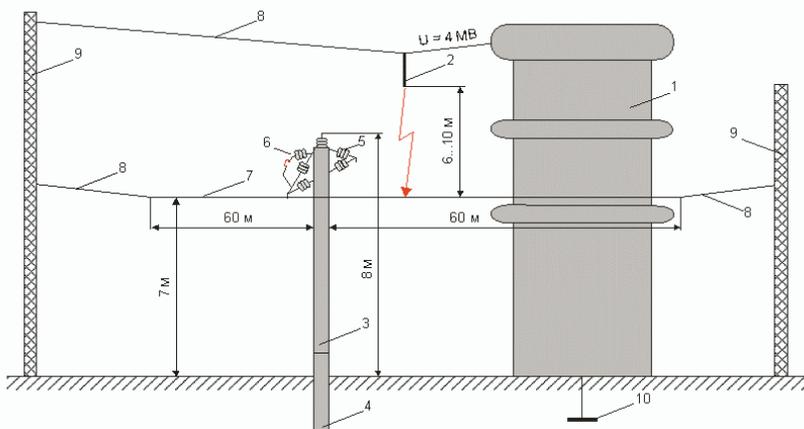


Рисунок 1 – Схема испытания УЗАП грозовым и коммутационным импульсом напряжения, сопротивление заземления опоры 380 Ом:

1 – генератор импульсных напряжений ГИН-6000/960; 2 – высоковольтный электрод; 3 – опора ВЛЭП 6/10 кВ; 4 – основание опоры ВЛЭП; 5 – изоляторы; 6 – УЗАП; 7 – имитатор провода ЛЭП 6/10 кВ; 8 – изолирующий канатик; 9 – опора; 10 – заземление ГИН



Рисунок 2 – Монтаж УЗАП на опоре и общий вид испытательной площадки

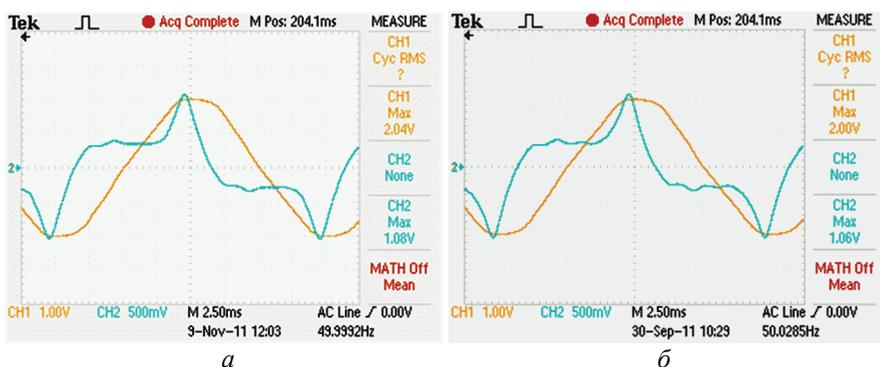
Для регистрации срабатывания УЗАП производилось их фотографирование в момент разряда ГИН на изолированный провод фрагмента линии. С помощью фотоснимков фиксировался пробой искрового промежутка (ИП) разрядника УЗАП или перекрытие изоляторов траверсы на опору.

До и после проведения всех испытаний измерялись контрольные характеристики УЗАП-0 и УЗАП-К: классификационное напряжение ограничителей перенапряжений и среднее напряжение разрядного искрового промежутка. Измерение классификационного напряжения ограничителей при классификационном токе значением 1мА проводилось по методике и в соответствии с тре-

бованиями ГОСТ Р 52725-2007. Типовые осциллограммы классификационного напряжения при классификационном токе приведены на рис. 4.



Рисунок 3 – Линия 10 кВ с подвешенным над ней высоковольтным электродом



а

б

Рисунок 4 – Типовые осциллограммы напряжения и тока через ОПН: *а* – Осциллограмма напряжения промышленной частоты и тока через УЗАП-К (УКЛАСС =  $U_{MAX}/\sqrt{2} = 14,5$  кВ; ИКЛАСС = 1,08 мА); *б* – Осциллограмма напряжения промышленной частоты и тока через УЗАП-О (УКЛАСС =  $U_{MAX}/\sqrt{2} = 14,2$  кВ; ИКЛАСС = 1,06 мА)

Измерение среднего разрядного напряжения искрового промежутка проводилось методом 100 % разрядного напряжения по ГОСТ 1516.2-97 в сухом состоянии на промышленной частоте. Типовые осциллограммы напряжения промышленной частоты при пробое разрядного промежутка УЗАП представлены на рис. 5.

#### Результаты испытаний УЗАП при воздействии грозовых и коммутационных импульсов напряжения

Испытания проводились по схеме, приведенной на рисунке 1, путем воздействия на УЗАП грозовым импульсом напряжения со временем подъема 2,5

мкс и длительностью импульса 50мкс и коммутационным импульсом напряжения со временем подъема 250мкс и длительностью импульса 2500 мкс. Величина испытательного напряжения изменялась в пределах 1,6-3,0 МВ.

Типовые осциллограммы импульса напряжения при разряде генератора импульсов (ГИН) в изолированный провод линии 10 кВ представлены на рис. 6, 7.

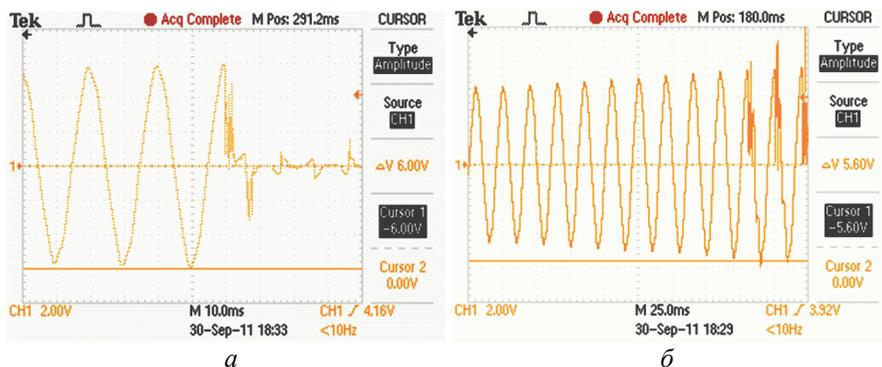


Рисунок 5 – Осциллограммы напряжения промышленной частоты при пробое разрядного промежутка УЗАП: а –  $U_{\text{ДЕЙСТВ}} = 60 \text{ кВ}$ ; б –  $U_{\text{ДЕЙСТВ}} = 60 \text{ кВ}$

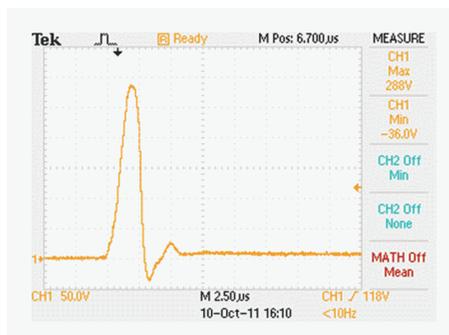


Рисунок 6 – Типовая осциллограмма грозового импульса напряжения при разряде ГИН в изолированный провод линии 10 кВ ( $U_{\text{max}} = 2,3 \text{ МВ}$ )

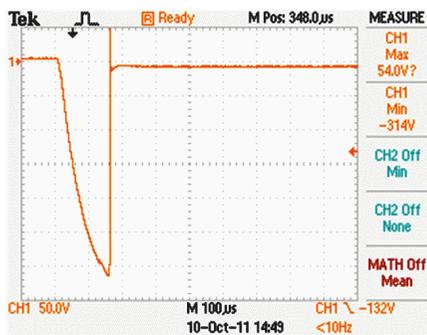


Рисунок 7 – Типовая осциллограмма коммутационного импульса напряжения при разряде ГИН в изолированный провод линии 10 кВ ( $U_{\text{max}} = 2,51 \text{ МВ}$ )

### Результаты испытаний УЗАП-О на воздействие грозовых импульсов напряжения

На фрагмент линии с последовательно установленным на опорном изоляторе траверсы УЗАП-0 напряжением 6 кВ и 10 кВ подавалось по 15 грозовых импульсов напряжения амплитудой 1,6-2,4 МВ. Результаты испытаний УЗАП-0 на напряжение 6 кВ и 10 кВ приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний УЗАП-0 на 6 и 10 кВ грозвым импульсом напряжения

№ п/п	Форма импульса напряжения $T_{фр}/T_{сп}$ , мкс	Полярность	Количество импульсов, шт.	Сопротивление заземления опоры, Ом	Импульсное напряжение разряда в линии, МВ	Ток через УЗАП-0, кА	Кол-во срабатываний разрядника	Перекрытые изоляторов траверсы
УЗАП-0 на 6кВ								
1	1,2/50	-	15	380	1,6-2,2	2-3	15	нет
2	1,2/50	-	15	4	1,6-2,2	3-4	15	нет
3	1,2/50	+	15	4	1,6-2,2	3-4	15	нет
4	1,2/50	+	15	380	1,6-2,2	2-3	15	нет
УЗАП-0 на 10кВ								
5	1,2/50	-	15	380	1,8-2,4	2-3	15	нет
6	1,2/50	-	15	4	1,8-2,4	3-4	15	нет
7	1,2/50	+	15	4	1,8-2,4	3-4	15	нет
8	1,2/50	+	15	380	1,8-2,4	2-3	15	нет

В результате фото и визуального контроля перекрытий изоляции траверсы не наблюдалось. Происходил устойчивый пробой искрового промежутка и ограничение грозового перенапряжения. Типовая форма разряда грозового импульса в изолированный провод линии приведена на рис. 7. Типовая форма пробоя искрового промежутка УЗАП-0 при воздействии грозового импульса напряжения приведена на рис. 8.



Рисунок 7 – Разряд грозового импульса в изолированный провод линии 10кВ с УЗАП-0 на траверсе



Рисунок 8 – Пробой искрового промежутка УЗАП-0

### Результаты испытаний УЗАП-О на воздействие коммутационных импульсов напряжения

На фрагмент линии с последовательно установленным на опорном изоля-

торе траверсы УЗАП-0 напряжением 6кВ и 10кВ подавалось по 15 коммутационных импульсов напряжения амплитудой 1,6-2,9 МВ. Результаты испытаний УЗАП-0 на напряжение 6кВ и 10кВ приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний УЗАП-0 на 6 и 10кВ коммутационным импульсом напряжения

№ п/п	Форма импульса на-пряжения $T_{фр}/T_{сп}$ , мкс	Полярность	Кол-во им-пульсов, шт	Сопротив-ление зазем-ления опоры, Ом	Импульсное напряжение разряда в линии, МВ	Ток через УЗАП-0, кА	Кол-во сра-багиваний разрядника	Перекрытые изоляторов траверсы
УЗАП-0 на 6кВ								
1	250/2500	+	15	380	1,6-2	0,1-0,15	15	нет
2	250/2500	+	15	4	1,6-1,8	0,1-0,15	15	нет
3	250/2500	-	15	4	2,0-2,6	0,1-0,15	15	нет
4	250/2500	-	15	380	2,0-2,6	0,1-0,15	15	нет
УЗАП-0 на 10кВ								
5	250/2500	+	15	380	1,7-2	0,1-0,15	15	нет
6	250/2500	+	15	4	1,8-2	0,1-0,15	15	нет
7	250/2500	-	15	4	2,4-2,9	0,1-0,15	15	нет
8	250/2500	-	15	380	2,4-2,9	0,1-0,15	15	нет



Рисунок 9 – Разряд коммутационного импульса в изолированный провод линии 10 кВ с УЗАП-0



Рисунок 10 – Пробой искрового промежутка УЗАП-0

В результате фото и визуального контроля перекрытий изоляции траверсы не наблюдалось. Происходил устойчивый пробой искрового промежутка и ограничение коммутационного перенапряжения. Типовая форма разряда коммутационного импульса в изолированный провод линии приведена на рис. 9.

Типовая форма пробоя искрового промежутка УЗАП-0 при воздействии коммутационного импульса напряжения приведена на рис. 10.

### Испытание УЗАП-К на воздействие грозовых импульсов напряжения

На фрагмент линии с последовательно установленным на подвесном изоляторе траверсы УЗАП-К напряжением 6кВ и 10кВ подавалось по 15 грозовых импульсов напряжения амплитудой 1,8-2,4 МВ. Результаты испытаний УЗАП-К на напряжение 6 кВ и 10кВ приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты испытаний УЗАП-К на 6 и 10 кВ при воздействии грозового импульса напряжения

№ п/п	Форма импульса на-пряжения $T_{фр}/T_{сп}$ , мкс	Полярность	Кол-во им-пульсов,	Сопро-тив-ление заземления опоры, Ом	Импульсное напряжение разряда в линии, МВ	Ток через УЗАП-К, кА	Кол-во сра-батываний разрядника	Перекрытие изоляторов траверсы
УЗАП-К на 6кВ								
1	1,2/50	-	15	380	1,8-2,4	2-3	15	нет
2	1,2/50	-	15	4	1,8-2,4	3-4	15	нет
3	1,2/50	+	15	4	1,8-2,4	3-4	15	нет
4	1,2/50	+	15	380	1,8-2,4	2-3	15	нет
УЗАП-К на 10кВ								
5	1,2/50	-	15	380	1,8-2,4	2-3	15	нет
6	1,2/50	-	15	4	1,8-2,4	3-4	15	нет
7	1,2/50	+	15	4	1,8-2,4	3-4	15	нет
8	1,2/50	+	15	380	1,8-2,4	2-3	15	нет



Рисунок 11 – Разряд грозового импульса в изолированный провод линии 10кВ с УЗАП-К на траверсе



Рисунок 12 – Пробой искрового промежутка УЗАП-К

В результате фото и визуального контроля перекрытий изоляции траверсы не наблюдалось. Происходил устойчивый пробой искрового промежутка и ограничение грозового перенапряжения. Типовая форма разряда грозового импульса в изолированный провод линии приведена на рис. 11. Типовая форма пробоя искрового промежутка УЗАП-К при воздействии грозового импульса напряжения приведена на рис. 12.

### Испытание УЗАП-К на воздействие коммутационных импульсов напряжения

На фрагмент линии с последовательно установленным на подвесном изоляторе траверсы УЗАП-К напряжением 6 и 10 кВ подавалось по 15 коммутационных импульсов напряжения амплитудой 1,7-2,9 МВ. Результаты испытаний УЗАП-К на напряжение 6 кВ и 10 кВ приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний УЗАП-К на 6 и 10 кВ при воздействии коммутационного импульса напряжения

№ п/п	Форма импульса на-пряжения $T_{фр}/T_{сп}$ , мкс	Полярность	Кол-во им-пульсов, шт.	Сопротив-ление заземления опоры, Ом	Импульсное напряжение разряда в линии, МВ	Ток через УЗАП-К, кА	Кол-во сра-батываний разрядника	Перекрытие изоляторов траверсы
<b>УЗАП-К на 6кВ</b>								
1	250/2500	+	15	380	1,7-2	0,1-0,15	15	нет
2	250/2500	+	15	4	1,8-2	0,1-0,15	15	нет
3	250/2500	-	15	4	2,4-2,9	0,1-0,15	15	нет
4	250/2500	-	15	380	2,4-2,9	0,1-0,15	15	нет
<b>УЗАП-К на 10кВ</b>								
5	250/2500	+	15	380	1,7-2	0,1-0,15	15	нет
6	250/2500	+	15	4	1,8-2	0,1-0,15	15	нет
7	250/2500	-	15	4	2,4-2,9	0,1-0,15	15	нет
8	250/2500	-	15	380	2,4-2,9	0,1-0,15	15	нет

В результате фото и визуального контроля перекрытий изоляции траверсы не наблюдалось. Происходил устойчивый пробой искрового промежутка и ограничение коммутационного перенапряжения. Типовая форма разряда коммутационного импульса в изолированный провод линии приведена на рис. 13. Типовая форма пробоя искрового промежутка УЗАП-К при воздействии грозового импульса напряжения приведена на рис. 14.

### Испытание изоляции траверсы без защиты при воздействии грозовых и коммутационных импульсов напряжения

На фрагмент линии без установленного на траверсе УЗАП-К последовательно подавалось 15 грозовых импульсов напряжения амплитудой 1,6-2,5

МВ. Типовая форма разряда грозового импульса в изолированный провод линии 10кВ приведена на рис. 15. В результате фото и визуального контроля наблюдалось устойчивое перекрытий изолятора траверсы. Типовая форма пробоя изолятора траверсы при воздействии грозового импульса напряжения приведена на рис. 16.



Рисунок 13 – Разряд коммутационного импульса в изолированный провод линии 10кВ с установленным на опоре УЗАП-К



Рисунок 14 – Пробой искрового промежутка УЗАП-К



Рисунок 15 – Типовая форма разряда грозового импульса в изолированный провод линии 10кВ без защиты



Рисунок 16 – Типовая форма перекрытия изолятора траверсы при воздействии грозового импульса напряжения

На фрагмент линии без установленного на траверсе УЗАП-К последовательно подавалось 15 коммутационных импульсов напряжения амплитудой 2-2,5 МВ. Типовая форма разряда коммутационного импульса в изолированный провод линии 10 кВ приведена на рис. 17. В результате фото и визуального

контроля наблюдалось устойчивое перекрытие изолятора траверсы. Типовая форма пробоя изолятора траверсы при воздействии грозового импульса напряжения приведена на рис. 18.

Таким образом, при отсутствии устройств защиты наблюдалась 100 % вероятность перекрытия изоляции траверсы с последующим переходом в силовую дугу напряжения промышленной частоты, что приводит к повреждению изоляторов, опор и проводов.

### **Испытание УЗАП-0 и УЗАП-К на воздействие грозовых и коммутационных импульсов напряжения под дождем**

Так как работы проводились на открытой площадке, то для испытания под дождем был приурочен день с дождливой погодой. При этом на фрагмент линии с установленными на траверсе УЗАП-0 и УЗАП-К последовательно подавалось по 10 грозовых импульсов и 10 коммутационных импульсов напряжения амплитудой 1,4-1,8 МВ в период интенсивной дождевой обстановки.



Рисунок 17 – Типовая форма разряда коммутационного импульса в изолированный провод линии 10 кВ без защиты



Рисунок 18 – Типовая форма перекрытия изолятора траверсы при воздействии коммутационного импульса напряжения

В результате фото и визуального контроля перекрытий изоляции траверсы под дождем не наблюдалось. Регистрировался стабильный пробой искрового промежутка УЗАП при воздействии грозового и коммутационного импульсов напряжения аналогично данным, приведенным выше при испытании устройств защиты в сухом состоянии.

Результаты испытаний подтвердили надежность устройств защиты типа УЗАП-0 и УЗАП-К при воздействии грозового и коммутационного импульсов напряжения, как в сухом состоянии, так и под дождем.

### **Испытание УЗАП-0 и УЗАП-К на воздействие грозовых и коммутационных импульсов напряжения при различной величине сопротивления**

### **заземления опоры**

На фрагмент линии с установленными на траверсе УЗАП-0 и УЗАП-К последовательно подавалось по 10 грозовых импульсов и 10 коммутационных импульсов напряжения амплитудой 1,6-2,4 МВ при последовательном изменении величины сопротивления заземления опоры. Величина сопротивления заземления опоры составляла в первом случае 4 Ом, во втором – 380 Ом. При величине сопротивления заземления, равной 380 Ом, испытания проводились по схеме, приведенной на рис. 1.

В результате фото и визуального контроля перекрытий изоляции траверсы не наблюдалось. Видимой разницы в работе УЗАП-0 и УЗАП-К по ограничению грозовых и коммутационных перенапряжений при существенном (в 95 раз) изменении величины сопротивления заземления опоры не наблюдалось.

### **Выводы**

1. Разработана методика натуральных испытаний устройств защиты типа УЗАП установленных на изолирующей траверсе металлической опоры СПС 80/8 высотой 8 м с подключенным фрагментом линии электропередачи при воздействии грозового и коммутационного импульсов напряжения.

2. В результате испытаний не наблюдалось сквозного или частичного перекрытия изолирующей траверсы, минуя устройство защиты. Испытания показали, что устройства защиты от атмосферных перенапряжений типа УЗАП обеспечили защиту высоковольтной линии напряжением 6 и 10 кВ от грозовых и коммутационных перенапряжений, как положительной, так и отрицательной полярности.

3. После воздействия на защитные устройства грозовыми и коммутационными импульсами напряжения в количестве не менее 100 и амплитудой до 3 МВ контролируемые параметры испытываемых ОПН не изменились.

4. При изменении величины сопротивления заземления опоры с 4 Ом до 380 Ом (в 95 раз) разницы в срабатывании УЗАП по ограничению грозовых и коммутационных перенапряжений не наблюдалось.

*Поступила в редколлегию 12.04.2012.*

*М.Ю.ОХРИМЕНКО*, асистент, НТУ «ХП»

## **ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОРИСТУВАЧІВ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ**

Розглянуто структуру інформаційного забезпечення первинної обробки інформації в сполучених системах спостереження повітряного простору. Проведено оцінку характеристик виявлення повітряного об'єкта при спільному використанні сигналів первинного й вторинного каналів системи спостереження. Виявлено, що реалізація сумісної обробки інформації усіх інформаційних каналів сполученої системи спостереження призводить до підвищення показників якості інформаційного забезпечення споживачів.

The structure of information providing of primary information processing systems in the joint air space supervision systems are considered. The evaluation of the characteristics of the object detecting air in the sharing of signals of primary and secondary channels of the monitoring system are found. It was revealed that the implementation of joint processing of all information channels dual monitoring system increases the quality of information support of consumers.

Рассмотрена структура информационного обеспечения первичной обработки информации в совмещенных системах наблюдения воздушного пространства. Проведена оценка характеристик обнаружения воздушного объекта при совместном использовании сигналов первичного и вторичного каналов системы наблюдения. Выявлено, что реализация совместной обработки информации всех информационных каналов сопряженной системы наблюдения приводит к повышению показателей качества информационного обеспечения потребителей.

**Постановка проблеми й аналіз літератури.** Історично інформаційні технології (ІТ) у процесі отримання, збору, обробки, зберігання й розповсюдження аеронавігаційних даних використовувалися починаючи з вторинної обробки інформації (ВОІ) систем спостереження (СС) повітряного простору (ПП), а первинна обробка інформації (ПОІ) здійснювалася у СС. Це призвело до складностей у виборі показників якості інформаційного забезпечення (ІЗ) користувачів, тобто був неможливий єдиний параметр для оптимізації характеристик ПОІ та ВОІ [1]. Реалізація цифрової обробки інформації у СС та підвищення продуктивності ЕОМ дозволили здійснювати обробку інформації СС починаючи з виходів фазових детекторів. Це дозволило використовувати ІТ для автоматизації процесів отримання, обробки й відображення інформації від різнорідних СС та здійснювати мережеву обробку інформації. ІЗ системи контролю ПП здійснюється, як правило, сполученими СС [1,2], що включають до свого складу первинну та одну чи дві вторинні (запитальні) СС. Це дає можливість сформулювати повний формуляр повітряного об'єкту (ПО), який видається споживачам інформації сполученою СС.

У [3] наведено як загальну структуру ІЗ користувачів, так і інтегральний показник якості ІЗ користувачів при застосуванні ІТ починаючи з ПОІ СС. Однак слід зазначити, що ведучою у ІЗ є первинна СС, координатна інформація (КІ) ПО якої і закладається у формуляр ПО. Обчислення КІ ПО вторинними (запитальними) СС потрібне тільки для поєднання інформації первинних та

запитальних СС, що суттєвим чином зменшує ІЗ користувачів.

**Мета роботи.** Підвищення якості ІЗ користувачів при використанні ІТ на етапі накопичення та поєднання інформації сумісних СС.

**Основна частина.** Структура первинної обробки інформації в сполучених СС показана на рис. 1. Вона є двоканальною й формує об'єднану інформацію для споживачів на основі вагового об'єднання результатів каналного виявлення й оцінок векторів каналних вимірів ПО з одночасним включенням до складу інформаційного блоку й польотної інформації, отриманої по каналах запитальних СС.

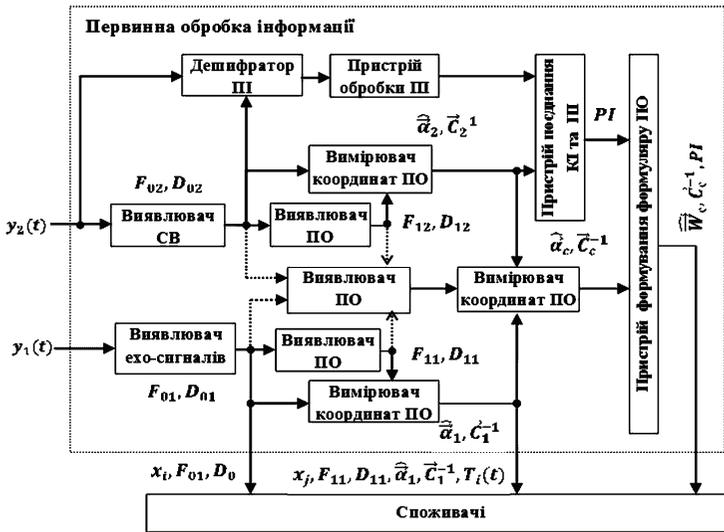


Рисунок 1 – Структура інформаційного забезпечення користувачів

Отримані в кожному з каналів оцінки векторів виміру, разом з кореляційними матрицями помилок виміру надходять на пристрій об'єднання оцінок. В пристрої об'єднання оцінок, на основі аналізу оцінок векторів виміру й кореляційних матриць помилок виміру обчислюється оцінка результуючого вектора вимірів і результуюча кореляційна матриця помилок. Результуючий вектор виміру  $\hat{\alpha}_p$ , разом з результуючою кореляційною матрицею помилок  $\hat{C}_p^{-1}$ , видаються споживачам.

Інформація вторинних СС використовується для одержання бортової інформації від літальних апаратів, яка також передається споживачеві. При цьому слід зазначити, що для об'єднання оцінки вектора вимірів ПО, отриманої від первинної СС, і польотної інформації, отриманої вторинними СС, на запитальних СС здійснюються всі ті процедури виявлення й виміру, що й на первинній СС. Ця обставина може бути врахована при обробці інформації та дозволить підвищити якість інформації, що видається споживачам.

Оцінимо характеристики виявлення ПО при спільному використанні сигналів первинного й вторинного каналів сполученої СС.

У випадку об'єднання каналних розв'язків, бінарно-квантовані послідовності імпульсів з виходів виявлювачів сигналів у кожному з каналів сполученої СС надходять на виявлювач ПО. Результати каналних виявлень сигналів можуть поєднуватись відповідно до правил «1 з 2» або «2 з 2» і далі, об'єднана послідовність розв'язків надходить на виявлювач. Завдання виявлювача ПО полягає в тому, щоб на основі аналізу послідовності нулів і одиниць, що надходять, ухвалити рішення (оптимальним образом) про наявність або відсутність ПО. Для вирішення задач виявлення необхідно одержати відношення правдоподібності й порівняти його з порогом, обраним відповідно до припустимої ймовірності хибної тривоги виявлення. Функції правдоподібності для гіпотез  $H_1$  і  $H_0$  можна записати в наступному вигляді

$$L(x_i / H_1) = \prod_{i=1}^N P_{cn}^{x_i}(x_i) [1 - P_{cn}^{x_i}(x_i)]^{1-x_i}; \quad (1)$$

$$L(x_i / H_0) = \prod_{i=1}^N P_n^{x_i}(x_i) [1 - P_n^{x_i}(x_i)]^{1-x_i}, \quad (2)$$

де  $x_i$  – об'єднана послідовність нулів і одиниць.

Використовуючи (1) і (2), відношення правдоподібності можна записати як

$$l(x_i) = \frac{L(x_i / H_1)}{L(x_i / H_0)} = \prod_{i=1}^N \left( \frac{P_{cn}(x_i)}{P_n(x_i)} \right)^{x_i} \cdot \left( \frac{1 - P_{cn}(x_i)}{1 - P_n(x_i)} \right)^{1-x_i} \geq l_0, \quad (3)$$

Логарифмуючи (3) та перетворюючи отриманий вираз, одержуємо

$$\sum_{i=1}^N x_i \eta_i \geq C, \quad (4)$$

де

$$\eta_i = \ln \frac{P_{cn}(x_i) [1 - P_{cn}(x_i)]}{P_n(x_i) [1 - P_n(x_i)]}; \quad C = \ln l_0 - \sum_{i=1}^N \ln \frac{1 - P_{cn}(x_i)}{1 - P_n(x_i)}.$$

Таким чином, алгоритм оптимального виявлення ПО (4) зводиться до підсумовування вагових коефіцієнтів  $\eta_i$ , обумовлених формами діаграм спрямованості антен відповідного каналу сполученої СС, відповідно до позицій пачки, де  $x_i = 1$ .

Отже, характерною рисою вирішального пристрою виявлення ПО у спільній СС є наявність двох порогів. Перший поріг встановлюється в граничних пристроях виявлювача сигналів кожного з каналів спільної СС. Цей поріг аналоговий і за допомогою тільки його можна змінювати умовну ймовірність хибної тривоги на виході спільного виявлювача ПО. Другий поріг встановлюється в граничному обладнанні спільного виявлювача ПО і є порогом виявлення ПО. Він може бути тільки дискретним.

Якщо припустити, що  $P_{cn}(x_i)$  однакова в межах усієї ширини діаграми спрямованості антен сполученої СС (пачка прийнятих сигналів має прямокутну форму), то алгоритм (4) зводиться до вигляду:

$$\sum_{i=1}^N x_i \geq C_1 . \quad (5)$$

Як випливає з виразу (5), у випадку прямокутної пачки процедура виявлення ПО зводиться до підрахунку одиниць, у межах ширини пачки, і порівняння числа накопичених імпульсів із граничним числом  $C_1$ .

На рис. 2-3 наведено характеристики виявлення ПО, для виявлювача при використанні двох каналів виявлення (первинний і вторинний), а на рис. 4-5 – трьох каналів виявлення (первинний, вторинний і ідентифікаційний). Розглянуто випадок однакових значень відносин с/ш  $q_i$ ,  $q_{1,m}$  для сигналів як первинного, так і вторинного каналів спільної СС. У цьому випадку багатоканальне виявлення дає найбільший ефект.

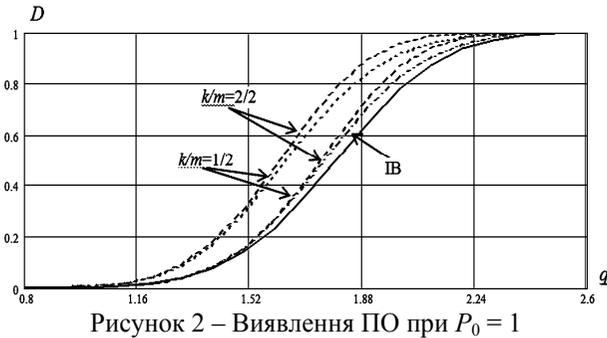


Рисунок 2 – Виявлення ПО при  $P_0 = 1$

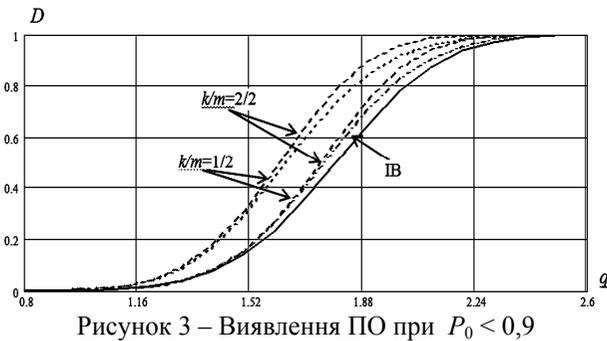


Рисунок 3 – Виявлення ПО при  $P_0 < 0,9$

Аналізуючи рис. 2-3, можна зробити наступні висновки:

- ІЗ споживачів має кращі показники при використанні методу обробки сигналів, заснованого на накопиченні з наступним об'єднанням;
- коефіцієнт готовності (КГ) літакового відповідача істотно впливає на якість ІЗ. Так вже при  $P_0 < 0.9$  використання такого об'єднання є небажаним.

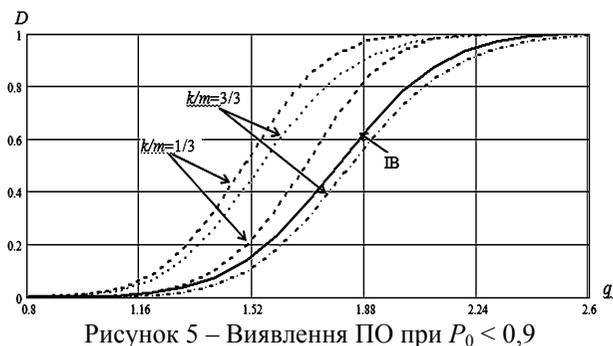
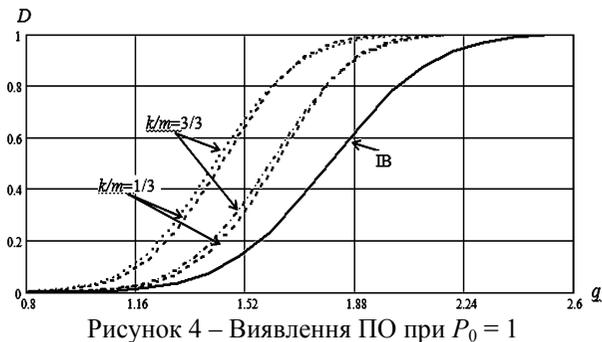
Порівняльний аналіз рис. 2-5 дозволяє зробити наступні висновки:

- при збільшенні числа поєднуваних каналів спільної СС до трьох якість

ІЗ споживачів поліпшується;

– КГ літакового відповідача істотно впливає на якість ІЗ.

Слід зазначити, що було розглянуто випадок однакових відносин сигнал-шум у каналах обробки спільної СС. На практиці ж, відношення сигнал-шум вторинних каналів спільної СС значно перевершує цей показник первинного каналу.



**Висновки.** Використання сумісної обробки інформації каналів СС ПП при широкому застосуванні ІТ на етапі первинної обробки інформації дозволяє підвищити показники якості ІЗ споживачів.

**Список літератури:** 1. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации / А.Фарина, Ф.Студер. – М.: Радио и связь, 1993. – 319 с. 2. Комплексне інформаційне забезпечення систем управління польотами авіації та протиповітряної оборони / Ткачев В.В., Даник Ю.Г., Жуков С.А. і др. – К.: МОУ, 2004. – 342 с. 3. Обод І.І. Структура та показники якості інформаційного забезпечення споживачів системами спостереження повітряного простору / І.І.Обод, Г.Е.Заволодько // Системи обробки інформації: Збірник наукових праць. – Вип. 8 (98). – Х.: 2011. – С. 106-109. 4. Черних О.П., Обод І.І. Охрименко М.Ю. Розподілена обробка інформації у сполучених мережах систем спостереження повітряного простору // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 2 (92). – С. 180-182. 5. Обод І.І., Охрименко М.Ю., Турін О.О., Черних О.П. Структура та показники якості інформаційного забезпечення споживачів сполученими системами спостереження повітряного простору // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ, 2011. – Вип. 1 (17). – С. 24-26.

Надійшла до редакції 12.04.2012.

*А.А.ПЕТКОВ*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

## **ПРОГРАММИРУЕМЫЙ РАЗРЯД ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ НА НЕЛИНЕЙНУЮ НАГРУЗКУ**

У роботі запропонована методика аналітичного розрахунку програмованого розряду подібних ємнісних накопичувачів енергії на параметричне навантаження з використанням східчастої апроксимації його часової залежності. Показано задовільний збіг результатів аналітичного й чисельного рішень.

The technique of analytical calculation of the programmed discharge of similar energy capacitor stores on parametrical loading with use of step approximation of its time dependence is offered in the work. Satisfactory correlation of results of the analytical and numerical solutions is shown.

В работе предложена методика аналитического расчета программируемого разряда подобных емкостных накопителей энергии на параметрическую нагрузку с использованием ступенчатой аппроксимации его временной зависимости. Показано удовлетворительное совпадение результатов аналитического и численного решений.

**Постановка проблемы.** При испытаниях различного электротехнического и электронного оборудования, на стойкость к воздействию электромагнитных факторов естественного и искусственного происхождения, широко используются генераторы импульсов тока на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). Многообразии областей применения испытательных импульсов тока обуславливает широкую вариацию их амплитудно-временных параметров, что в свою очередь требует разработки и создания соответствующего испытательного оборудования.

Формирование испытательных импульсов тока с широкой гаммой амплитудно-временных параметров при использовании одного ЕНЭ в экономически оправданных рамках достаточно проблематично и, как показывает опыт, в крупных испытательных центрах имеется несколько ЕНЭ с различным напряжением зарядки и различной запасаемой энергией. Возможности испытательных комплексов существенно расширяются при использовании параллельного разряда нескольких ЕНЭ на общую нагрузку. При этом разряд ЕНЭ может осуществляться одновременно (постоянная структура разрядной цепи) или со сдвигом во времени (переменная структура разрядной цепи). Разряд со сдвигом во времени имеет больше возможностей для формирования различных импульсов. Однако для проектирования испытательных устройств такого класса требуется разработка специальных методов их расчета.

**Анализ публикаций.** Исторически первыми устройствами с изменяемой в процессе разряда структурой являются генераторы импульсов напряжения со срезающим разрядником. С их помощью формируются испытательные импульсы напряжения, воздействующие на изоляцию оборудования, снабженного защитными элементами [1].

Вторым типом устройств с переменной структурой разрядной цепи являются генераторы импульсов тока с замыкателями нагрузки, получившие ши-

рокое распространение, как в области испытаний, так и при проведении физических исследований [2, 3]. Использование замыкателей позволяет корректировать форму импульса тока в нагрузке.

В последнее время были проведены исследования параллельного разряда нескольких ЕНЭ на одну нагрузку со сдвигом во времени (программируемая коммутация ЕНЭ) [4-8].

Управление структурой разрядной цепи может производиться в зависимости от времени протекания импульса тока (воздействия импульса напряжения) и в зависимости от его характерных значений (например, в момент достижения максимального значения).

Накопленный теоретический материал позволяет в настоящее время все высоковольтные импульсные устройства с переменной структурой разрядной цепи рассматривать как устройства с программируемой коммутацией.

В известных работах по программируемой коммутации ЕНЭ расчеты базируются на специально разработанных [6-8] и планируемых к разработке [4, 5] приближенных численных методах. Имеются также ограничения на параметры элементов ЕНЭ и напряжение их зарядки [6-8].

Работы [9-10] являются дальнейшим развитием идей предложенных в [6] и переводят решение задачи из плоскости использования численных приближенных методов в плоскость аналитического решения. Одновременно снимаются ограничения на значения напряжения зарядки ЕНЭ, и ослабляется требование к параметрам подключаемых ЕНЭ. Однако в данных работах рассматривается программируемый разряд на линейную нагрузку.

**Целью** настоящей работы является разработка методики аналитического расчета программируемого разряда подобных емкостных накопителей энергии на нелинейную нагрузку.

**Материалы и результаты исследований.** Рассмотрим  $n$  ЕНЭ, которые могут подключаться через индивидуальные коммутаторы на общую нагрузку, как показано на рис. 1. Пусть все ЕНЭ подобны, то есть для их параметров выполняются следующие условия:

$$\frac{R_n}{R_j} = \frac{L_n}{L_j} = \frac{C_j}{C_n}, \quad (1)$$

где  $R_n, L_n, C_n$  – параметры  $n$ -го ЕНЭ;  $R_j, L_j, C_j$  – параметры  $j$ -го ЕНЭ.

Соотношение (1) имеет место в случае, если каждый  $k$ -ый ЕНЭ состоит из  $m_k$  одинаковых модулей с параметрами  $R', L', C'$  и его параметры соответственно равны:

$$R_k = \frac{R'}{m_k}; \quad L_k = \frac{L'}{m_k}; \quad C_k = m_k C', \quad (2)$$

где  $k = 1 \dots n$ .

В общем случае напряжения зарядки ЕНЭ имеют различные значения  $U_{C1} \neq U_{C2} \neq \dots \neq U_{Ck} \neq \dots \neq U_{Cn}$ . Каждый из коммутаторов  $F_1 \dots F_n$  включается в соответствующий момент времени  $T_1 \dots T_n$ , причем  $T_1 = 0$  и  $T_k \leq T_j$  для  $k < j$ .

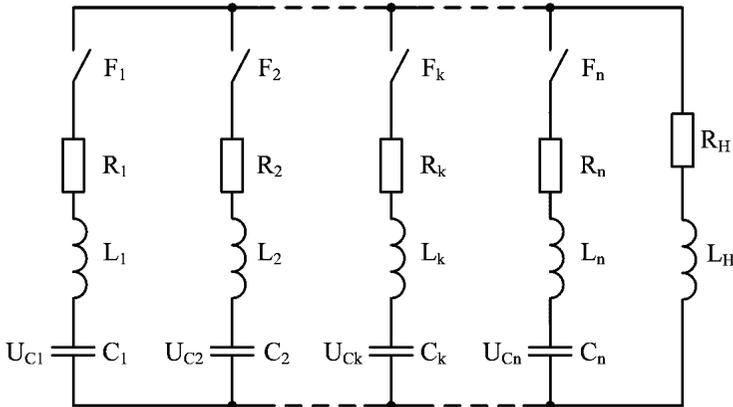


Рисунок 1 – Схема включения ЕНЭ:  $R_1 \dots R_n, L_1 \dots L_n, C_1 \dots C_n, U_{C1} \dots U_{Cn}$  – соответственно активное сопротивление, индуктивность, емкость и напряжение зарядки ЕНЭ;  $R_H, L_H$  – соответственно активное сопротивление и индуктивность нагрузки;  $F_1 \dots F_n$  – коммутаторы

В дальнейшем будем использовать две системы амплитудно-временных координат. В первой началом отсчета времени является момент включения первого ЕНЭ, и время обозначим  $T$ . Во второй системе – время отсчитывается от момента включения  $k$ -го ЕНЭ  $T_k$  и обозначим  $t = T - T_k$ .

В [9] показано, что переходный процесс в схеме, показанной на рис. 1, при последовательном включении ЕНЭ может быть аналитически описан с помощью рекуррентных соотношений, получаемых из решения двух вспомогательных задач.

Результатом решения первой задачи является аналитическое описание переходного процесса при ненулевых начальных условиях в схеме, показанной на рис. 2.

Для данной схемы по второму закону Кирхгофа в операторной форме имеем

$$I_{e,k}(p)Z(p) = -\frac{U_{Ce,k}(T_k)}{p} + (L_{e,k} + L_H)i_{e,k}(T_k). \quad (3)$$

Операторное сопротивление цепи имеет вид

$$Z(p) = pL_e + R_e + \frac{1}{pC_{e,k}}, \quad (4)$$

где  $L_e = L_{e,k} + L_H$ ;  $R_e = R_{e,k} + R_H$ .

В зависимости от соотношения параметров элементов схемы в разрядной цепи может протекать импульс тока различной формы, который во временной области для  $t \geq T - T_k$  может быть представлен в виде

$$i_{e,k}(t) = i'_{e,k}(t) + i''_{e,k}(t), \quad (5)$$

где  $i'_{e,k}(t)$  – составляющая полного тока, определяемая наличием в начальный

момент напряжения  $U_{e,k}(T_k)$  на эквивалентной емкости  $C_{e,k}$ ;  $i''_{e,k}(t)$  – составляющая полного тока, определяемая наличием в начальный момент тока  $i_{e,k}(T_k)$  в индуктивностях эквивалентной схемы  $L_{e,k}$  и  $L_H$ .

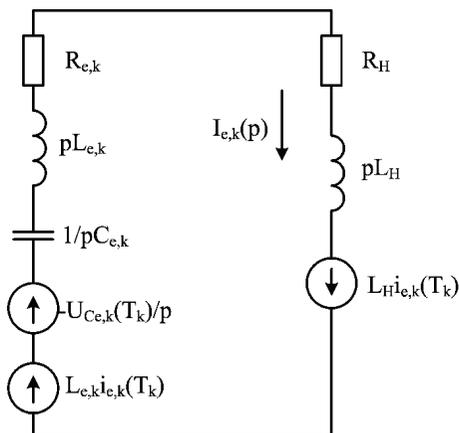


Рисунок 2 – Эквивалентная послекоммутационная схема:  
 $R_{e,k}$ ,  $L_{e,k}$ ,  $C_{e,k}$  – соответственно эквивалентные активное сопротивление, индуктивность и емкость ветви эквивалентного ЕНЭ;  $U_{e,k}(T_k)$ ,  $i_{e,k}(T_k)$  – соответственно напряжение зарядки эквивалентного ЕНЭ и ток в цепи в момент коммутации  $T_k$

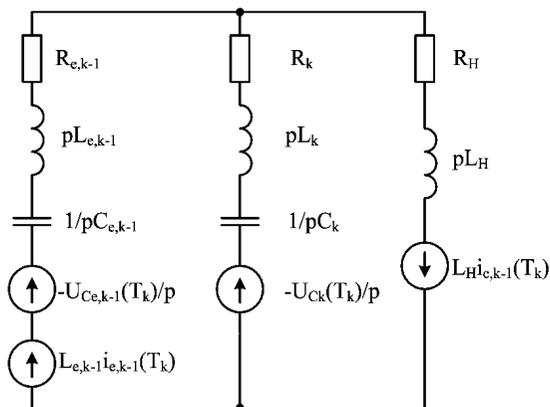


Рисунок 3 – Послекоммутационная схема двух ЕНЭ:  
 $R_{e,k-1}$ ,  $L_{e,k-1}$ ,  $C_{e,k-1}$  – соответственно эквивалентные активное сопротивление, индуктивность и емкость ветви  $k - 1$  – го эквивалентного ЕНЭ;  $U_{e,k-1}(T_k)$ ,  $i_{e,k-1}(T_k)$  – соответственно напряжение зарядки  $k - 1$  – го эквивалентного ЕНЭ и ток в цепи в момент коммутации  $T_k$ ;  $R_k$ ,  $L_k$ ,  $C_k$ ,  $U_{Ck}(T_k)$  – соответственно активное сопротивление, индуктивность, емкость и напряжение зарядки подключаемого  $k$  – го ЕНЭ

Напряжение на емкости  $C_{e,k}$  может быть представлено в виде:

$$u_{C_{e,k}}(t) = U_{C_{e,k}}(T_k) + u'_{C_{e,k}}(t) + u''_{C_{e,k}}(t), \quad (6)$$

где  $i'_{C_{e,k}}(t)$  – составляющая напряжения, связанная с наличием в начальный момент напряжения  $U_{C_{e,k}}(T_k)$  на эквивалентной емкости  $C_{e,k}$ ;  $i''_{e,k}(t)$  – составляющая напряжения, связанная с наличием в начальный момент тока  $i_{e,k}(T_k)$  в индуктивностях эквивалентной схемы  $L_{e,k}$  и  $L_H$ .

Результатом решения второй задачи является преобразование схемы, показанной на рис. 3 к схеме, показанной на рис. 2.

Преобразование осуществляется с использованием теоремы Миллмана [11] при условии подобия ЕНЭ. При этом имеют место следующие соотношения для ее параметров:

$$R_{e,k} = \frac{R'}{\sum_{j=1}^k m_j}; \quad L_{e,k} = \frac{L'}{\sum_{j=1}^k m_j}; \quad C_{e,k} = C' \sum_{j=1}^k m_j, \quad (7)$$

где  $R', L', C'$  – параметры модулей;  $m_j$  – количество модулей в  $j$ -ом ЕНЭ.

Напряжения и токи в момент коммутации рассчитываются по рекуррентным соотношениям:

$$U_{C_{e,k}}(T_k) = \frac{U_{C_{e,k-1}}(T_k) \sum_{j=1}^{k-1} m_j + U_{C_k}(T_k) m_k}{\sum_{j=1}^k m_j}; \quad (8)$$

$$i_{e,k}(T_k) = i_{e,k-1}(T_k), \quad (9)$$

где  $U_{C_k}(T_k)$  – напряжение зарядки подключаемого  $k$ -го ЕНЭ в момент  $T_k$ , а начальные значения напряжения эквивалентного ЕНЭ и ток в его ветви и нагрузке имеют вид  $U_{C_{e,1}}(T_1) = U_{C_1}(T_1)$ ,  $i_{e,1}(T_1) = 0$ .

Рассмотренные выше решения двух вспомогательных задач позволяют получить аналитическое решение задачи программируемого подключения  $n$  подобных ЕНЭ.

Пусть в момент времени  $T = T_1 = 0$  к нагрузке подключается первый ЕНЭ. Тогда ток в нагрузке в интервале времени до подключения второго ЕНЭ  $[T_1, T_2]$  можно найти из решения первой задачи (см. рис. 2) при условии, что  $R_{e,k} = R_{e,1} = R_1$ ,  $L_{e,k} = L_{e,1} = L_1$ ,  $C_{e,k} = C_{e,1} = C_1$ ,  $i_{e,k}(T_k) = i_{e,1}(T_1) = 0$ ,  $U_{C_{e,k}}(T_k) = U_{C_{e,1}}(T_1) = U_{C_1}(T_1)$ .

В момент времени  $T = T_2$  подключается второй ЕНЭ и эквивалентная схема разрядной цепи принимает вид, показанный на рис. 3. Далее, осуществляя эквивалентные преобразования, перейдем к схеме, показанной на рис. 2, предварительно рассчитав параметры эквивалентного ЕНЭ по соотношениям (7)

$$R_{e,2} = \frac{R'}{m_1 + m_2}; \quad L_{e,2} = \frac{L'}{m_1 + m_2}; \quad C_{e,2} = C'(m_1 + m_2);$$

$$U_{C_{e,2}}(t_2) = \frac{U_{C_{e,1}}(T_2)m_1 + U_{C_2}(T_2)m_2}{m_1 + m_2}; \quad i_{e,2}(T_2) = i_{e,1}(T_2),$$

где  $i_{e,1}(T_2)$  и  $U_{C_{e,1}}(T_2)$  – соответственно ток в цепи и напряжение на первом конденсаторе в момент  $T_{2-0}$ , то есть до момента коммутации (подключения второго ЕНЭ), которые определяются из решения первой задачи по соотношениям (5) и (6);  $R'$ ,  $L'$ ,  $C'$  – параметры модулей;  $m_1$  и  $m_2$  – количество модулей в 1-ом и 2-ом ЕНЭ.

Продолжая процесс расчета подобным образом, мы можем последовательно рассчитать изменение тока в нагрузке для каждого из интервалов  $[T_1 = 0, T_2], [T_2, T_3], \dots, [T_{k-1}, T_k], \dots, [T_n, \infty)$ .

Рассмотренная выше линейная  $RL$ -нагрузка представляет широкую гамму реальных объектов, однако не исчерпывает все множество вариантов, встречающихся на практике, например в качестве нагрузки ЕНЭ могут выступать элементы с различным типом нелинейности, в частности, параметрические элементы, у которых значения параметров зависят от времени [12], то есть исходя из (4) имеем

$$L_e = L_{e,k} + L_H(T); \quad R_e = R_{e,k} + R_H(T). \quad (10)$$

Если значения параметров нагрузки изменяются скачком в момент коммутации  $k$ -го ЕНЭ и далее остаются постоянными до момента коммутации  $k + 1$ -го ЕНЭ, то в межкоммутационном интервале времени  $[T_k, T_{k+1}]$  параметры импульса тока могут быть определены по (5) и (6) с учетом изменившихся значений параметров нагрузки.

На рис. 4 приведены результаты расчетов программированного разряда 4-х ЕНЭ на параметрическую нагрузку. Параметры ЕНЭ при расчете составляли: напряжение зарядки  $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} = 1 \cdot 10^4$  В; емкость  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 2,5 \cdot 10^{-6}$  Ф; индуктивность  $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 4 \cdot 10^{-6}$  Гн; активное сопротивление  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 0,8$  Ом. Индуктивность нагрузки  $L_H = 9 \cdot 10^{-6}$  Гн. Для сопротивления нагрузки, представленной в виде ступенчатой кривой 1, с использованием материалов [10] был определен режим формирования импульса тока с квазипостоянной вершиной (кривая 2). В этом режиме времена коммутации ЕНЭ составили  $T_1 = 0$ ;  $T_2 = 1,36 \cdot 10^{-5}$  с;  $T_3 = 2,67 \cdot 10^{-5}$  с;  $T_4 = 3,72 \cdot 10^{-5}$  с.

Для проверки возможности применения ступенчатого представления непрерывно изменяющейся во времени нагрузки при расчете программируемого разряда ЕНЭ, было проведено схемотехническое моделирование программируемого разряда указанных выше 4-х ЕНЭ с использованием программной среды Micro-Cap (кривая 4). Для этого ступенчатая кривая 1 была аппроксимирована зависимостью вида

$$R_H = 5,78 \cdot 10^{13} T^3 - 2,07 \cdot 10^9 T^2 - 4,59 \cdot 10^4 T + 2,1894, \quad (11)$$

график которой представлен на рис. 4 пунктирной кривой 3.

Как видно из сопоставления кривых 2 и 4, формы импульсов тока достаточно близки, что подтверждает возможность использования полученных соотношений для расчетов программируемого разряда ЕНЭ на параметрическую нагрузку. Причем с увеличением количества подключаемых ЕНЭ (а значит, и

увеличением количества аппроксимирующих ступеней) точность расчетов увеличивается.

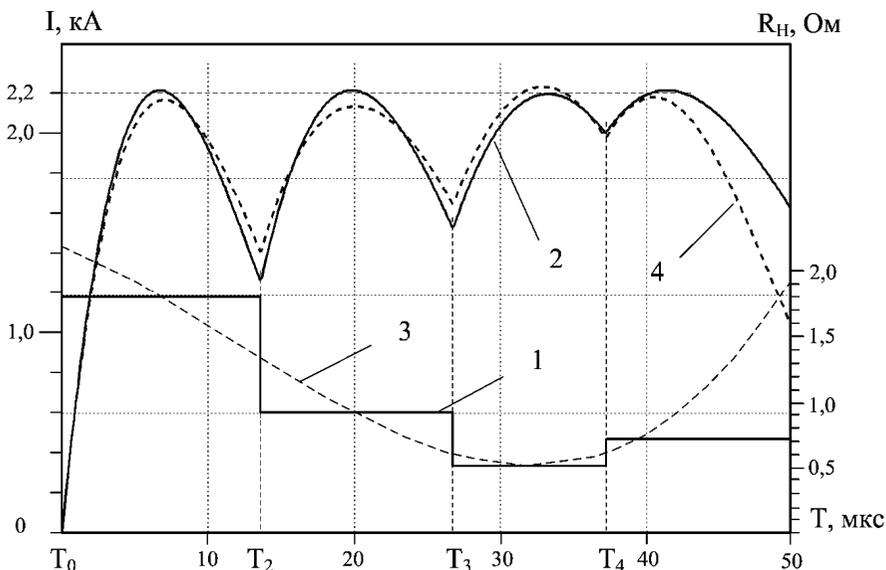


Рисунок 4 – Изменение сопротивления нагрузки и тока в процессе разряда

### Выводы

1. Предложена методика аналитического расчета программированного разряда подобных емкостных накопителей энергии на параметрическую нагрузку с использованием ступенчатой аппроксимации ее временной зависимости. Показано удовлетворительное совпадение результатов аналитического и численного решения.

2. Результаты расчетов, проведенных по предложенной методике при ступенчатой аппроксимации временной зависимости активного сопротивления нагрузки, показали удовлетворительное совпадение с результатами схемотехнического моделирования.

Приведенные материалы могут служить базой для разработки методики синтеза программы коммутации подобных емкостных накопителей энергии на нелинейную нагрузку.

**Список источников информации:** 1. Смирнов С. М. Генераторы импульсов высокого напряжения : монография / С. М. Смирнов, П. В. Терентьев. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 240 с. 2. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / П.Н. Дацук, С.Л. Зайени, В.С. Комельков и др.; под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с. 3. Баранов М.И. Применение мощных генераторов импульсных напряжений в схеме с замыкателем нагрузки для получения больших импульсных токов молнии / М.И. Баранов, Н.Н. Игнатенко, А.К. Колобовский // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Электроэнергетика и преобразовательная техника». – Х.: НТУ «ХПИ», 2004. – № 4. – С. 37-45. 4. Блащенко А.Д. Подход к синтезу емкостного электроразрядного источника энергии для разрядноимпульсных технологий / А.Д. Блащенко, Н.Д. Дивак

// Физика импульсных разрядов в конденсированных средах : междунар. науч. конф., 17-21 августа 2009 г. : тезисы докл. / Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины. – Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2009. – С. 151-153. **5. Блащенко А.Д.** Подход к синтезу многоконтурного электроразрядного источника энергии для разрядноимпульсных технологий / *А.Д. Блащенко, Н.Д. Дивак* // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах : междунар. науч. конф., 17-21 августа 2009 г. : тезисы докл. / Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины. – Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2009. – С. 149-150. **6. Фридман Б.Э.** Переходные процессы при программируемом разряде емкостного накопителя энергии / *Б.Э. Фридман* // Электричество. – 1989. – № 12. – С. 36-41. **7. Емелин П.Ю.** Исследование программируемого разряда емкостного накопителя энергии / *П.Ю. Емелин, Ф.Г. Рутберг, Б.Э. Фридман* // Известия академии наук. Энергетика. – 1994. – № 3. – С. 41-49. **8. Фридман Б.Э.** Формирование импульса тока при программируемом разряде емкостного накопителя энергии / *Б.Э. Фридман* // Электричество. – 1999. – № 6. – С. 42-48. **9. Петков А.А.** Переходные процессы при программируемой коммутации подобных емкостных накопителей энергии / *А.А. Петков* // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 4. – С. 60-64. **10. Петков А.А.** Формирование испытательных импульсов тока при программируемом разряде подобных емкостных накопителей энергии / *А.А. Петков* // Технічна електродинаміка. – 2010. – Ч. 3, тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – С. 161-164. **11. Конторович М.И.** Операционное исчисление и процессы в электрических цепях / *М.И. Конторович*. – М.: Сов. радио, 1975. – 320 с. **12. Филиппов Е.** Нелинейная электротехника / *Е. Филиппов* : пер. с нем. – М. : Энергия, 1976. – 496 с.

*Поступила в редколлегию 14.03.2012.*

УДК 004.73

**В.М.ПОШТАРЕНКО**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХП»;  
**Д.С.БОГОМАЗ**, аспірант, НТУ «ХП»;  
**М.А.ІВАНОВ**, магістр, НТУ «ХП»;  
**К.Д.КЕРЕМЖАНОВ**, магістр, НТУ «ХП»

## **ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СПЕКТРУ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ТЕХНОЛОГІЇ IEEE 802.22**

Розглянуто загальну методіку оцінки використання спектру системами радіозв'язку. На її основі запропоновано методіку розрахунку технічної ефективності впровадження технології безпроводних регіональних мереж IEEE 802.22 з урахуванням первинної мережі телебачення. Проведено оцінку ефективності використання спектру цією технологією для заданого регіону та доведено доцільність побудови подібних мереж.

The general method of estimation spectrum use of radio communication systems is considered. The calculation of the technical efficiency in implementation of wireless technology of regional networks of IEEE 802.22 over primary television network is proposed on basis of this method. The estimation of spectrum use efficiency of this technology in specified region is performed and the feasibility of development such networks is proved.

Рассмотрена общая методика оценки использования спектра системами радиосвязи. На ее основе предложена методика расчета технической эффективности внедрения технологии беспроводных региональных сетей IEEE 802.22 с учетом первичной телевизионной сети. Проведена оценка эффективности использования спектра этой технологией для заданного региона и доказана целесообразность построения подобных сетей.

**Постановка проблеми.** В даний час попит на послуги безпроводних телекомунікаційних систем широкосмугового доступу не забезпечений повною мірою, особливо у приміських і сільських місцевостях, бо постачальники цих послуг найчастіше орієнтовані на густонаселені райони і великі міста. Виходячи з цього, можна стверджувати, що розробка і реалізація безпроводних мережевих рішень регіонального масштабу є актуальною і перспективною.

Зараз приділяється багато уваги збільшенню ефективності використання радіоспектру. Впровадження технологій радіозв'язку з використанням механізмів інтелектуального управління (когнітивне радіо) представляє собою перспективний підхід для забезпечення більш ефективного використання радіочастотного спектру за рахунок динамічного та гнучкого управління ним [4].

Тому доцільно використовувати принципи когнітивного радіо для побудови безпроводних регіональних мереж. Перший стандарт, що використовує ці принципи, IEEE 802.22 WRAN був прийнятий у липні 2011 р. Він передбачає роботу в телевізійному частотному діапазоні, що дозволяє досягати радіуса дії до 100 км без обмеження потужності, тобто призначений для реалізації регіональних безпроводних мереж [8].

Підвищення ефективності використання спектру є однією з ключових завдань когнітивних радіосистем, а значить і системи 802.22. Щоб зрозуміти, наскільки істотно це підвищення, тобто доцільність застосування даної технології в тому чи іншому регіоні, необхідно оцінити ефективність використання радіоспектру в даному регіоні при реалізації мережі 802.22 з урахуванням існуючих ТБ систем [9].

**Аналіз літератури.** Після того, як Дж. Мітола визначив основні принципи когнітивного радіо [1], постала проблема практичної реалізації цієї концепції [2]. Адаже таким чином можна визначити ефективність рішень на його основі [12]. Багато публікацій приділяли увагу розвитку та вдосконаленню першого безпроводного стандарту на базі когнітивного радіо IEEE 802.22 WRAN [3, 5, 6]. Але досі немає визначеної методики розрахунку принаймні технічної ефективності застосування цієї технології [4, 7], бо економічну ефективність може бути оцінена тільки за наявності обладнання та комерційних проектів [12].

**Метою статті** є розробка методики оцінки технічної ефективності впровадження регіональної безпроводної мережі на основі технології IEEE 802.22.

**Узагальнена методика оцінки використання спектру системами радіозв'язку.** Коефіцієнт використання спектру ( $U$ ) – міра використання спектру, визначається як добуток ширини смуги частот, геометричного (географічного) простору і часу, які виключені для надання телекомунікаційних послуг іншим можливим користувачам:

$$U = B \cdot S \cdot T, \quad (1)$$

де  $B$  – ширина смуги частот;  
 $S$  – геометричний простір (площа);  
 $T$  – час.

Згідно з визначенням *SUE* (ефективність використання спектру, ЕВС) системи радіозв'язку, вона може бути виражена комплексним критерієм (1):

$$SUE = \{M, U\} = \{M, B \cdot S \cdot T\}, \quad (2)$$

де *M*– корисний ефект, що отримується за допомогою системи радіозв'язку;  
*U*– коефіцієнт використання спектру для системи.

Якщо необхідно, комплексний індикатор ефективності спектру може бути перетворений до простого індикатору: відношенню корисного ефекту до коефіцієнта використання спектру [10]:

$$SUE = \frac{M}{U} = \frac{M}{B \cdot S \cdot T}. \quad (3)$$

### Методика оцінки технічної ефективності використання спектру для систем когнітивного радіо.

#### *Вибір початкових даних для оцінки використання спектру*

Для оцінки використання спектру треба визначити географічний район, для якого буде проводитися оцінка. В даному випадку оцінка проводиться для Харківської області. Для розрахунку вона ділиться на 30 ділянок з різною густиною населення, бо оцінка ефективності використання спектру повинна передбачати ці коливання (рис.1, табл. 1). Кількість прийнятих каналів у кожній ділянці визначається згідно реєстру присвоєння радіочастот [11].

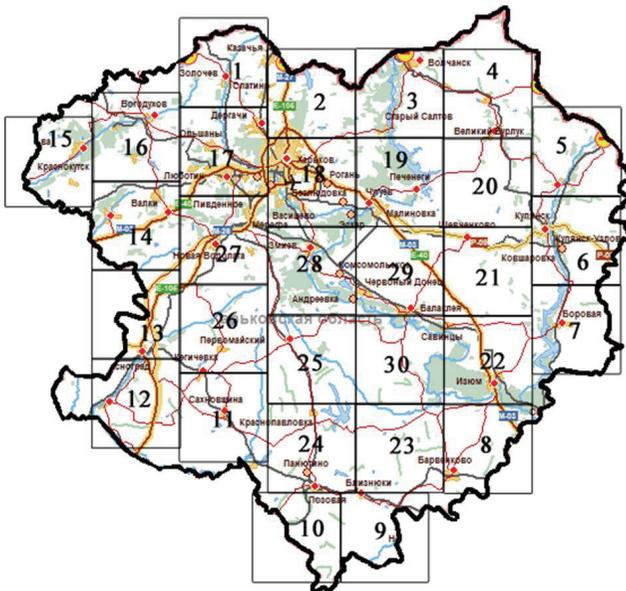


Рисунок 1 – Розбиття області на окремі ділянки з різною густиною населення

Визначимо основні дані, необхідні для розрахунку:

– Площа області  $S_{заг} = 31415 \text{ км}^2$ ;

- Населення області  $N = 2756000$  чол.;
- Кількість робочих каналів ТБ систем  $N_k = 62$ ;
- Кількість ділянок  $I = 30$ ;
- Площа кожної ділянки  $S_{дiл} = 1047$  км<sup>2</sup>;

Спочатку треба провести оцінку ТБ системи, оскільки вона є первинним користувачем ресурсу. ЕВС вторинної системи покаже, який вигреш у використанні спектру отримує оператор, що реалізує дане рішення, а також, зрештою, користувачі та держава, яка витратить менше коштів на управління даним ресурсом.

Таблиця 1 – Визначення густини населення для різних ділянок області та кількості каналів, що приймаються у ділянці

Номер ділянки	Населення, $n_i$ тис. чол.	Кількість каналів $k_i$	Частка населення $a_i$	Номер ділянки	Населення, $n_i$ тис. чол.	Кількість каналів $k_i$	Частка населення $a_i$
1	51,8	14	0,018795	16	44,1	13	0,016001
2	25,1	13	0,009107	17	178,9	19	0,064911
3	26	15	0,009434	18	1555,1	20	0,564239
4	29,6	14	0,01074	19	72,1	20	0,02616
5	9,6	10	0,003483	20	13,1	14	0,004753
6	61,2	15	0,022205	21	24,6	14	0,008926
7	15,4	13	0,005588	22	57	16	0,020681
8	21,2	11	0,007692	23	13,4	13	0,004862
9	18,5	11	0,006712	24	67,3	14	0,024419
10	28,3	12	0,010268	25	48,4	15	0,017561
11	15,4	15	0,005588	26	42,8	13	0,015529
12	43,3	14	0,015711	27	32,3	16	0,011719
13	45,6	12	0,016545	28	81,7	18	0,029643
14	30,2	14	0,010958	29	68,3	15	0,024781
15	27	10	0,009796	30	8,8	14	0,003193

*Розрахунок ЕВС для систем телевізійного мовлення.* Корисність телевізійних радіопередач визначається кількістю користувачів (населенням), здатних приймати радіопередачі, як правило, в місці їх проживання. Корисний ефект системи телевізійного радіомовлення повинен змінюватися в залежності від щільності населення в різних частинах розглянутого географічного району і числа телевізійних програм, які можуть бути прийняті.

Вираз для показника корисного ефекту в аналітичній формі набуває вигляду:

$$M_{ТБ} = \sum_{i=1}^I \alpha_i k_i, \quad (4)$$

де  $I$  – кількість елементів, на які розділено географічний район

$\alpha_i = n_i/N$  – частка населення, що проживає в межах  $i$ -ї ділянки;  
 $n_i$  – кількість жителів, що проживає в межах  $i$ -ї ділянки;  
 $k_i$  – кількість ТБ програм, що можуть бути прийняті у  $i$ -й ділянці;  
 $N$  – чисельність населення у географічному районі.

В даному випадку населення області  $N = 2756000$  чол. з числом окремих елементів району, тобто ділянок  $I = 30$ . Кількість доступних ТБ каналів у кожній ділянці наведена у табл. 1.

Корисний ефект може бути розрахований виходячи з представлених даних з використанням рівняння (4), за яким:

$$M_{ТБ} = 17,93 \approx 18 \cdot 8 = 144 \text{ МГц.}$$

Можна також стверджувати, що дана величина характеризує середню зайнятість каналів у області, тобто  $k_3 = M = 18$ , та може бути використана для оцінки ЕВС для вторинної системи.

За формулою (1) коефіцієнт використання спектру для даної системи становить 496 МГц чи 62 канали по 8 МГц, отже ТБ система передає інформацію весь час без перерв на всій території, яка розглядається ( $S=T=I$ ).

$$U_{ТБ} = B = 62 \cdot 8 = 496 \text{ МГц.}$$

Для оцінки ефективності використання спектру системами ТБ мовлення застосовуємо формулу (3):

$$SUE_{ТБ} = \frac{M_{ТБ}}{U_{ТБ}} = \frac{144}{496} = 0,29 .$$

Тобто ефективність використання спектру ТБ системами для Харківської області становить 29 %.

*Розрахунок ЕВС для систем IEEE 802.22* полягає у знаходженні деякої мінімальної степені використання спектру на всій території обслуговування, тобто мінімального трафіку, що буде переданий у разі, якщо всі абоненти у тій чи іншій ділянці почнуть передавати дані з мінімальною швидкістю.

Для даного розрахунку слід визначити ще деякі початкові дані, що стосуються безпосередньо системи IEEE 802.22. Виходячи з попередніх висновків щодо степені використання спектру ТБ системою, треба зазначити, що спектр, доступний для роботи цієї системи, це спектр, що не використовується ТБ системою. Тобто кількість доступних каналів у тій чи іншій ділянці визначається (5):

$$N_{ПК} = N_K - k_3 = 62 - 18 = 44. \quad (5)$$

Також слід визначити деякі основні характеристики стандарту IEEE 802.22, а саме:

- Радіус чарунку  $R = 33$  км;
- Площа чарунку  $S_v = \pi R^2 = 3419,46$  км<sup>2</sup>;
- Мінімальна швидкість передачі даних для абонента  $B_a = 1,884$  Мбіт/с (враховуються обидва напрямки передачі);
- Швидкість передачі даних в одному каналі  $B_K = 31$  Мбіт/с (враховуються обидва напрямки передачі).

Отже кількість абонентів  $n_K$ , що передають дані в одному каналі при часовому розподіленні становить (6):

$$n_k = B_k / B_a = 31 / 1,884 = 16. \quad (6)$$

Також можна визначити кількість чарунків  $N_c$  (рис. 2) на заданій території (7):

$$N_c = S_{зад} / S_c = 31415 / 3419,46 = 9. \quad (7)$$

Будь-яку систему можна спроектувати таким чином, щоб ефективність використання спектру цією системою наближалася до 100 %. Однак слід визначити найменше значення, що досягається цією системою при реалізації її у стандартному вигляді, тобто без оптимізації.

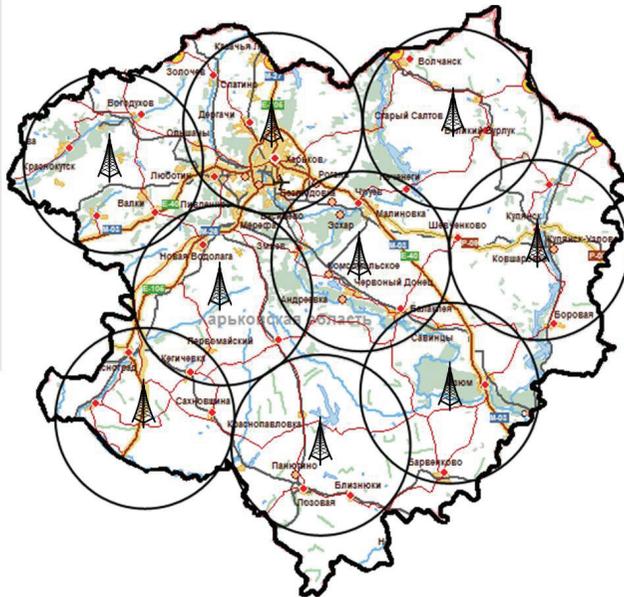


Рисунок 2 – Приблизне покриття IEEE 802.22 у Харківській області

Як було зазначено вище, мінімальний корисний ефект для даної системи визначається мінімальним трафіком чи мінімальною кількістю абонентів, що знаходяться у кожній ділянці, відповідно до частки населення, що знаходиться у межах  $i$ -ї ділянки.

Треба розрахувати кількість абонентів, що можуть одночасно отримати послуги зі швидкістю  $B_a$ . Вона визначається за кількістю робочих каналів, та за кількістю чарунків (8):

$$n_a = n_k \cdot N_c \cdot N_{pk} = 16 \cdot 9 \cdot 44 = 6336. \quad (8)$$

Якщо брати до уваги, що густина населення у різних ділянках різна, логічно припустити, що кількість абонентів у цих ділянках теж буде різна. Виходячи з цього і трафік, що формується у даній ділянці, буде колитися.

Тоді вираз для корисного ефекту буде мати вигляд (9):

$$M_{WRAN} = \sum_{i=1}^I \alpha_i n_a B_a. \quad (9)$$

В даному випадку це значення дорівнює  $M_{WRAN} = 5230,7$  Мбіт/с.

Коефіцієнт використання спектру може бути виражений як у МГц, так і у Мбіт/с, виходячи з того, що саме цей показник оцінюється. Для цього треба визначити так званий еталонний показник, тобто скільки трафіку могло бути у системі, якщо густина населення була б постійною величиною. Для цього треба визначити частку абонентів чарунки, що припадає на одну ділянку (10):

$$\lambda_{dli} = S_u / S_{dli} = 3419,46 / 1047 = 3,3. \quad (10)$$

Коефіцієнт використання спектру визначається за формулою (4.11), де показник  $B$  відображає трафік, що може бути отриманий з 9 чарунків при повній зайнятості усіх доступних каналів:

$$U_{WRAN} = B = (B_k \cdot N_{pk} \cdot I) / \lambda_{dli} = (31 \cdot 44 \cdot 30) / 3,3 = 12057,6 \text{ Мбіт/с}. \quad (11)$$

Для оцінки ефективності використання спектру системами IEEE 802.22 застосовуємо формулу (3):

$$SUE_{WRAN} = \frac{M_{WRAN}}{U_{WRAN}} = \frac{5230,7}{12057,6} = 0,44.$$

Тобто мінімальна ефективність використання спектру системами IEEE 802.22 для Харківської області без проведення оптимізації становить 44 %.

*Оцінка ефективності використання телевізійного спектру при впровадженні технології IEEE 802.22*

Для оцінки повної ефективності слід визначити степінь використання незадіяного у первинній мережі спектру, додати два розрахункових значення (12):

$$SUE_{\text{заз}} = (1 - SUE_{TB}) \cdot SUE_{WRAN} + SUE_{TB} = (1 - 0,29) \cdot 0,44 + 0,29 = 0,6. \quad (12)$$

Таким чином, при впровадженні технології IEEE 802.22 у Харківському регіоні ефективність спектру ТБ мовлення може зрости принаймні щонайменше до 60%, при цьому без загрози створення завад первинним користувачам і без плати за користування даним спектром.

**Висновки.** У даній статті описана методика розрахунку технічної ефективності використання спектру системами когнітивного радіо. Здійснено оцінку ефективності використання спектру технологією IEEE 802.22, що є мірою доцільності реалізації даного стандарту взагалі через відсутність реального обладнання та реалізованих проектів. Результати цієї оцінки свідчать про ефективність впровадження цього рішення і розгортання безпроводних регіональних мереж на його основі.

**Список літератури:** 1. *Mitola J.* Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio. – Ph.D. Dissertation, KTH, 2000. 2. *Mitola J.* Cognitive radio for flexible mobile multimedia communication // *Proc. IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC)*, November 1999. 3. *Raed Al-Zubi, Mohammad Z.* Siam Coexistence Problem in IEEE 802.22 Wireless Regional Area Networks. – Department of Electrical and Computer Engineering University of Arizona. 4. *Apurva N. Mody Gerald Chouinard* IEEE 802.22 Wireless Regional Area Networks. Resource [www.ieee802.org/22/technology/22-10-0073-03-0000-802-22-overview-and-core-technologies.pdf], 2010. 5. *Zander (Zhongding) Lei, Sung Hyun Hwang.* IEEE 802.22 PHY Overview. Resource [www.ieee802.org/22/technology/22-10-0106-00-0000-ieee-802-22-phy-overview.pdf], 2010. 6. *Alan J Weissberger.* IEEE 802.22 Wireless Regional Area Network (WRAN). Resource [http://www.viodi.com/newsletter/050302/article1.htm], 2005. 7. *Wendong Hu, Daniel Willkomm* Dy-

namic Frequency Hopping Communities for Efficient IEEE 802.22 Operation. – STMicroelectronics Inc., Technical University Berlin, University of California, Los Angeles. **8.** *Carlos Cordeiro, Kiran Challapal.* IEEE 802.22: The First Worldwide Wireless Standard based on Cognitive Radios. – Philips Research USA. **9.** *Carlos Cordeiro, Sai Shankar N.* IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios. – Philips Research North America **10.** *Рекомендація МСЭ-Р SM.1046-2* Определение использования радиочастотного спектра и эффективности радиосистемы. – Эл. ресурс: [http://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1046-2-200605-I/en]. **11.** *Український державний центр радіочастот.* Реєстр присвоєнь радіочастот. – Эл. ресурс: [http://www.ucrf.gov.ua/nzdb/freq\_index.php]. **12.** *Poshtarenko V. M., Vinogradova E. Y., Bogomaz D. S.* The designing of the wireless regional area networks based on cognitive radio technology // Вісник НТУ «ХП». – Х.: НТУ «ХП». – 2010. – № 45.

Надійшла до редколегії 10.04.2012.

УДК 681.3:004

**В.М.ПОШТАРЕНКО**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХП»;  
**Д.С.БОГОМАЗ**, аспірант, НТУ «ХП»;  
**К.Д.КЕРЕМЖАНОВ**, магістр, НТУ «ХП»;  
**М.О.ІВАНОВ**, магістр, НТУ «ХП».

## СХЕМА МАРШРУТИЗАЦІЇ QoS В МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ САМООРГАНІЗАЦІЇ

Проаналізовано схему одноадресної маршрутизації QoS у мережі на основі самоорганізації. Поведінка самоорганізації представлена з точки зору біо-подібних мереж та схеми одноадресної маршрутизації QoS, заснованої на алгоритмі AntNet.

A scheme of QoS unicast routing in the network based on self-organization is proposed. The behavior of self-organization represented in terms of bio-inspired networks and QoS unicast routing scheme based on the algorithm of AntNet.

Предложена схема одноадресной маршрутизации QoS в сети на основе самоорганизации. Поведение самоорганизации представлено с точки зрения био-подобных сетей и схемы одноадресной маршрутизации QoS основанной на алгоритме AntNet.

**Постановка проблеми.** Мережі на основі самоорганізації (SON – self-organization network) можуть бути використані щоб зменшити експлуатаційні витрати за рахунок зниження навантаження на експлуатаційний персонал шляхом автоматизації обслуговування та управління мережами. Вирішення проблем маршрутизації у SON, при якій забезпечується необхідна якість обслуговування є достатньо складною. Одним із перспективних напрямків пошуку алгоритмів маршрутизації може бути застосування аналогій заснованих на ройовому інтелекті.

**Аналіз літератури.** З розвитком конвергенції мережевих технологій майбутні мережі стануть дуже великими, гетерогеними та динамічними [1]. За-

стосування біологічно - подібних мереж може ефективно знизити просторово-часову складність формування мереж SON [2, 3]. Маршрутизація в SON повинна підтримувати якість обслуговування (QoS) та самоорганізацію [4]. Поведінка SON може бути представлена з точки зору біо-подібних мереж та схеми одноадресної маршрутизації QoS, заснованої на AntNet [7, 8].

**Метою статті** є аналіз схеми одноадресної маршрутизації QoS в мережі на основі самоорганізації.

**Початкові дані для оперування.** Розглядається SON, яка підтримує наступну динаміку самоорганізації. Вузол народжується шляхом створення та ініціалізації нового вузла. Вузлу стає відомо про середовище, що оточує його шляхом виявлення його сусідніх ланок та сусідніх вузлів. Створення або знищення зв'язку між вузлами означає підключення або відключення сусідніх вузлів. Навантаження міграції означає розподілення навантаження між сусідніми вузлами. Клонування вузлів означає створення нових вузлів шляхом тиражування одного вузла (новий вузол може замінити клонований вузол або розподілити його навантаження). Відтворення вузлів означає створення нового вузла двома або більш вузлами (новий вузол може замінити вузли-батьки або розподілити їх навантаження). Вузол, що спить означає вхід вузла в стан енергозбереження через відсутність робочого навантаження протягом тривалого періоду. «Кома» вузла означає тимчасове припинення роботи через не фатальні помилки. Відродження вузла означає, що сплячий вузол «прокидається» й знову починає працювати сам по собі або вузол в «комі» повертається до роботи після самозцілення. Пробудження вузла означає, що сплячий вузол «пробуджується» втручанням ззовні. Відновлення вузла означає, що вузол в «комі» починає працювати завдяки зовнішньому втручання. Смерть вузла означає недоступність вузла через фатальну помилку.

**Локальні маршрути.** С запуском системи маршрутизації, кожний вузол буде накопичувати декілька бажаних шляхів до інших вузлів. Коли надходить запит маршрутизації, один з бажаних шляхів, який був запам'ятовано, буде використаний, якщо він вдовольняє вимогам. Вузли використовують ці бажані шляхи, як локальну мережу, а шляхи називаються локальними маршрутами. Використання локальних маршрутів може зекономити час, однак, ці шляхи можуть не бути оптимальними. Таким чином, локальні маршрути повинні бути раціонально використані, наприклад, потрібно обмежувати довжину їх шага, використовувати їх тільки тоді, коли вони закінчуються в пункті призначення, періодично оновлювати їх. Якщо один локальний маршрут завжди успішно використовується при маршрутизації, система маршрутизації повинна встановити прямий зв'язок між двома кінцевими вузлами для подальшої оптимізації маршрутизації в майбутньому.

Кожний вузол складає таблицю своїх локальних маршрутів. Спочатку ця таблиця пуста. Зі старту системи маршрутизації деякі відомі шляхи поступово додаються в таблицю як локальні маршрути. Для локального маршруту обмежена лише довжина шляху. Коли локальний маршрут створюється в перший

раз, лічильник його використання буде встановлений як 0. Маршрутизуючий вузол періодично сканує свою таблицю локальних маршрутів, видаляючи ті локальні маршрути, які мають 0 в графі використання та скидає кількість використань для всіх інших.

**Опис алгоритму.** Мета запропонованої схеми маршрутизації — зробити зиск обох сторін таким, що наближується або досяг Парето оптимуму за обраним шляхом в рівновазі за Нешем, в той час як потреби користувача QoS задоволені. Також є надія якомога більше знизити споживання ресурсів мережі.

$$BW_{p_{sd}} \geq bw\_rq_L; \quad (1)$$

$$DL_{p_{sd}} \leq dl\_rq_H; \quad (2)$$

$$JT_{p_{sd}} \leq jt\_rq_H; \quad (3)$$

$$LS_{p_{sd}} \leq jt\_rq_H; \quad (4)$$

$$EP_{p_{sd}} \leq P_u. \quad (5)$$

Тут  $BW_{p_{sd}}$ ,  $DL_{p_{sd}}$ ,  $JT_{p_{sd}}$ ,  $LS_{p_{sd}}$ ,  $EP_{p_{sd}}$  являють собою доступну смугу пропускання, затримки, затримки джиттера, коефіцієнт помилок та вартість одиниці часу, що сплачується користувачем використовуючи  $P_{sd}$  окремо.

**AntNet.** У алгоритмі AntNet шлях знаходиться між джерелом та призначенням з використанням відправки «мурах» для пошуку шляху крок за кроком та використанням «мурах», що повертаються для оновлення таблиці маршрутизації [7]. Однак основний AntNet не підтримує QoS й відповідно доопрацювання необхідне. Крім того для вдосконалення ефективності пошуку шляху кількість «розвідувальних мурах», що працюють в мережі одночасно, повинна бути обмежена визначенням тривалості їх життя. При виконанні маршрутизації, якщо впродовж визначеного часу «мураха» не може дійти до місця призначення або йде шляхом, що не відповідає вимогам QoS, вона вмирає.

**Щільність феромону,** показник успішності маршрутизації й ступінь безпосередньої близькості адреси. Вузол  $v_s$  створює масив щільності феромону  $[PH_{d_{inj}}]_{I \times J}$ . Тут  $PH_{d_{inj}}$  є величиною щільності феромону якщо  $v_{nj}$  наступний вузол в ланцюгу  $v_s$  до пункту призначення  $v_{di}$ ,  $i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J$ . Якщо  $v_{di}$  дорівнює  $v_{nj}$ , початкове значення  $PH_{d_{inj}}$  дорівнює  $SD_{nj}$ , в іншому випадку 0. Кожний раз коли  $v_{nj}$  успішно визначається в якості наступного шагу маршрутизації  $v_s$  на шляху  $P_{sdi}$  від  $v_s$  до  $v_{di}$ , значення  $PH_{d_{inj}}$  зростає для зростання вірогідності вибору  $v_{nj}$  в якості наступного шагу маршрутизації у наступному пошуку. З плином часу, феромон буде випарюватися поступово та можливість вибору  $v_{nj}$  у якості наступного шагу маршрутизації буде поступово зменшуватися. Стабільність вузла також впливає на феромон. Чим більш стабільний вузол, тим більша щільність феромону повинна бути. Таким чином,  $PH_{d_{inj}}$  оновлюється наступним чином:

$$PH_{d_{inj}} = \left( PH_{d_{inj}} \cdot \rho + \frac{1}{E_{P_{sdi}}} \right) \cdot \zeta_{nj}. \quad (6)$$

Тут,  $\rho$  коефіцієнт згасання феромону,  $0 \leq \rho \leq 1$ .  $\zeta_{nj}$  – це відношення ступеню стійкості  $v_{nj}$  коли воно обрано в якості наступного шагу в цей раз порівняно до його ступеня стабільності в попередні рази.

Показник успішної маршрутизації на вузлі — це відношення кількості успішних спроб маршрутизації до загального числа спроб маршрутизації. Ступінь близькості адреси це довжина загального префіксу для двох IP-адрес до загальної довжини IP-адреси. Коли маршрутизація виконується, більш високий пріоритет повинно бути видано вузлу з більш високим рейтингом успішних маршрутизацій та який знаходиться ближче до адреси призначення. Це не тільки прискорить процес пошуку, але також допоможе зменшити кількість шагів.

**Вибір наступного шагу.** Коли визначається наступний шаг, вимоги користувача до QoS, щільність феромону вузла, показник успішності маршрутизації й ступінь близькості адреси повинні бути розглянути всебічно. Процес відбору описується так: 1) перевірити всі сусідні адреси  $v_n$ , які з'єднані з  $v_c$  напряму або через локальний маршрут та які не на даному шляху; якщо  $v_n$  працює добре й шлях  $P_{sn}$  від  $v_s$  до  $v_n$  вдовольняє формулам (1)–(5),  $v_n$  потрапить в список кандидатів на наступний шаг  $CS$ ; 2) якщо  $CS$  порожній, перейдіть до (5); 3) якщо є будь-який сплячий сусідній вузол на шляху  $v_n$  к  $v_c$ , його буде розбуджено; якщо є будь-який сусідній вузол  $v_n$  у «комі» до  $v_c$ , адміністратор відновлює його; якщо  $P_{sn}$  вдовольняє формулам (1)–(5),  $v_n$  вноситься в  $CS$ ; 4) якщо  $CS$  не порожній, перейдіть до (5); в іншому випадку пошук наступного шагу зазнав невдачу, кінець; 5) для  $v_c$  та кожної  $v_n \in CS$ , визначають ймовірність  $PR_n$  вибору  $v_n$  та обирають  $v_n$  з найвищим  $PR_n$  в якості наступного шагу, кінець.

$$PR_n = \begin{cases} PH_{dn} \cdot AS_n \cdot SR_n \cdot E_l^C & PH_{dn} \cdot AS_n \cdot SR_n \cdot E_l^C \leq 1; \\ 1 - \frac{1}{PH_{dn} \cdot AS_n \cdot SR_n \cdot E_l^C} & PH_{dn} \cdot AS_n \cdot SR_n \cdot E_l^C > 1. \end{cases} \quad (7)$$

Тут,  $AS_n$ ,  $SR_n$  и  $E_l^C$  відповідно представляють ступінь близькості адреси  $v_n$  и  $v_d$ , показник успішної маршрутизації  $v_n$  и оціночне значення користувача до загальної кількості  $e_l$  з'єднання  $v_c$  з  $v_n$ .

**Поведінка «мурах».** Є  $AN$  «мурах» й поведінка при пошуку шляху кожного  $FA_i$  ( $i = 1, \dots, AN$ ) визначається як: 1) встановити час життя  $FA_i$  — TTL та її шлях  $PT_i = \{v_s\}$ ; 2)  $FA_i$  визначається наступний вузол у ланцюгу  $v_n$ ; якщо вибір не вдався,  $FA_i$  знищується, кінець, в іншому випадку,  $PT_i = PT_i \cup \{v_n\}$ , якщо  $v_n = v_d$ ,  $FA_i$  повертається  $BA_i$ , переходимо до пункту 5); 3)  $TTL = TTL - 1$ ; 4) якщо  $TTL \neq 0$ , переходимо 2), інакше,  $FA_i$  знижується, кінець; 5) для кожного  $v_n \in PT_i$ ,  $BA_i$  оновлює значення щільності феромону за формулою (6); якщо локальний маршрут використано  $v_n$ , збільшує свій час використання; повторювати цей шаг поки  $BA_i$  не прийде до  $v_s$ .

**Висновки.** В цьому дослідженні запропоновано схему маршрутизації QoS, що базується на ройовому інтелекті. AntNet здатна знайти QoS шлях.

**Список літератури:** 1. *T. Nakano, T. Suda* Applying Biological Principles to Designs of Network Services // Applied Soft Computing, 2007. 2. *S. Dixit, A. Sarma* Self-organization in Networks Today // IEEE Communications Magazine, 2005. 3. *S. Balasubramaniam, D. Botvich, W. Donnelly* Bio-inspired Framework for Autonomic Communication Systems» // Studies in Computational Intelligence, 2009. 4. *G. Fodor, A. Eriksson, A. Tuoriniemi* Providing Quality of Service in Always Best Connected Networks // IEEE Communications Magazine, July 2003. 5. *B. Briscoe, V. Darlagiannis, O. Heckman et al.* A Market Managed Multi-service Internet // Computer Communications, 2003. 6. *F. Kuipers, P. V. Mieghem, T. Korkmaz et al.* An Overview of Constraint-based Path Selection Algorithms for QoS Routing // IEEE Communications Magazine, 2002. 7. *G. D. Caro, M. Dorigo* AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communication Networks // Artificial Intelligence, 1998. 8. *Xingwei Wang, Xuejiao Li* Intelligent QoS Unicast Routing Scheme in SON // Northeastern University, Shenyang, 2010.

*Надійшла до редколегії 13.04.2012.*

УДК 681. 3.07

**В.М.ПОШТАРЕНКО**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ»;  
**А.МЕРСНІ**, магістр, НТУ «ХПІ»

## **ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖ IP/MPLS НА ОСНОВІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Розроблена імітаційна модель магістральної мережі IP/MPLS телекомунікаційної компанії МТС із застосуванням оптимізації у середовищі Network Simulator та проведено порівняння характеристик продуктивності мережі з традиційним розподілом навантаження в IP/MPLS мережах.

Simulation model of IP/MPLS backbone networks for telecommunication company MTS using optimization in Network Simulator environment is developed and capability comparison of network with traditional traffic distribution in IP/MPLS is performed.

Разработана имитационная модель магистральной сети IP/MPLS телекоммуникационной компании МТС с использованием оптимизации в среде Network Simulator и проведено сравнение характеристик производительности сети с традиционным распределением нагрузки в IP/MPLS сетях.

**Постановка проблеми.** Популярність технології IP/MPLS як однієї з основних технологій транспортного рівня NGN швидко зростає. Але IP/MPLS наслідуює проблеми пакетної мережі IP. По-перше, це забезпечення поліпшення якості обслуговування переданого трафіку, тобто зниження затримок, зменшення втрат та збільшення інтенсивності потоків трафіку. По-друге, завантаження всіх ресурсів мережі повинно бути максимально можливим для підвищення обсягів переданого трафіку.

До недавнього часу задача оптимального використання ресурсів мережі вирішувалася найчастіше за допомогою перерозподілу ресурсів окремого маршрутизатора між різними потоками, що протікають через нього. У той же час такий потужний засіб, як вибір шляхів проходження трафіку через мережу, традиційно застосовувалося в IP-мережах в дуже обмежених масштабах. Від шля-

хів прямування трафіку (при його фіксованій інтенсивності) залежить завантаження маршрутизаторів і каналів, а значить, і ефективність використання мережі.

В сучасних протоколах задача маршрутизації розглядається як вибір найкоротшого шляху до адресата на підставі одного з простих параметрів, наприклад, часу доставки (затримка). Питання оптимізації продуктивності не є для них основним, у результаті маршрутизація найкоротшим шляхом часто створює незбалансований розподіл трафіку і, як наслідок, неефективне використання ресурсів мережі. Обраний шлях може бути більш раціональним, якщо в розрахунок приймається номінальна пропускна спроможність каналів зв'язку чи затримки, що вносяться ними, або менш раціональним, якщо враховується тільки кількість проміжних маршрутизаторів між вихідною та кінцевою мережами, але в будь-якому випадку вибирається єдиний маршрут навіть при наявності декількох альтернативних (рис. 1).

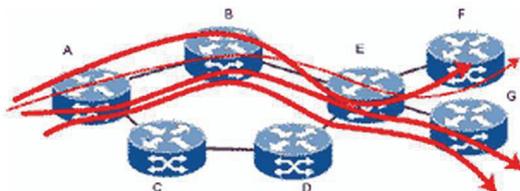


Рисунок 1 – Неефективність завантаження ресурсів мережі шляхами, що визначаються протоколами маршрутизації

Для вирішення завдань мінімізації перевантажень у процесі керування трафіком найбільш перспективними є методи Traffic Engineering (TE).

Під терміном Traffic Engineering розуміють методи і механізми досягнення збалансованості завантаження всіх ресурсів мережі за рахунок раціонального вибору шляху проходження трафіку через мережу. Механізм керування трафіком надає можливість встановлювати явний шлях, за яким будуть передаватися потоки даних.

Незважаючи на актуальність проблеми, до теперішнього часу немає чітко визначеного математичного апарату [7], який би здійснював оптимізацію мереж за допомогою TE. Тому для цього доцільне використання імітаційного моделювання, адже воно має такі переваги як легкість та наочність, а також можливість налаштування необхідної швидкості перебігу процесів у мережі.

**Аналіз літератури.** У літературі, присвяченій IP/MPLS [1, 2, 5], дедалі більше уваги приділяється питанням керування трафіком. Але найбільш перспективні методи – методи Traffic Engineering розглянуті досить поверхово, а офіційні документи по цій темі поки мають рекомендаційний характер [6, 7]. У статті [3] розглянуто проблеми керування трафіком у IP мережах і засоби технології MPLS, які їх вирішують. Існуючі публікації, присвячені оптимізації мереж IP/MPLS [4, 8] мають складну практичну реалізацію і здебільшого призначені для мереж на етапі проектування. У роботах [9, 10] представлені варі-

анти оптимізації мережі із застосуванням імітаційного моделювання. Результати роботи [12] доводять, що використання імітаційної моделі існуючої мережі дозволяє ефективно керувати трафіком і підвищувати продуктивність мережі.

**Метою статті** є розробка імітаційної моделі мереж IP/MPLS, що виконує оптимізацію за критерієм максимальної продуктивності на основі методів Traffic Engineering.

**Імітаційна модель** розроблена у середовищі Network Simulator (NS) [11]. Топологія ядра мережі відповідає топології магістральної мережі IP/MPLS оператора МТС, яка складається з 7 вузлів – великих міст України (рис. 2).

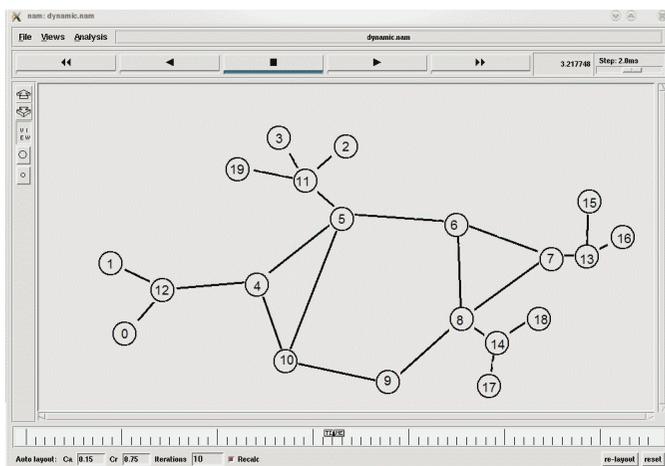


Рисунок 2 – Топологія мережі MPLS, що моделюється

Для передачі по мережі задано 5 потоків трафіку з постійною бітровою швидкістю і фіксованою довжиною пакетів з напрямками: 0→16, 1→15, 2→17, 3→18, 19→15. У процесі моделювання були задані пропускісні спроможності каналів зв'язку 2-3 Мбіт/с.

Після того, як були задані вимоги для передачі трафіку, необхідно розподілити потоки трафіку. Трафік був заданий спеціально з урахуванням того, щоб мережа не змогла обслужити його повністю за найкоротшого шляху, що робить ефективність перенаправлення потоків наочною. Тобто такий варіант цілком може трапитися під час експлуатації реальної мережі.

Імітаційна модель відображає поведінку мережі у часі, тому для зняття часових характеристик продуктивності будемо у певний момент часу змінювати дизайн шляхів з комутацією по мітках (LSP) для можливості порівняння результатів роботи мережі у різних ситуаціях. Розглянемо ці ситуації.

### 1. Використання стандартної маршрутизації для знаходження LSP

При моделюванні мережі MPLS система NS автоматично виконала зна-

ходження маршрутів для передачі заданого трафіку між абонентами, виходячи зі стандартних протоколів маршрутизації, які взаємодіють з MPLS. Згідно з ним для трафіку між граничними маршрутизаторами по мітках (LSR):

- LSR12 і LSR13 був встановлений LSP, що проходить через LSR4, LSR5, LSR6, LSR7;
- LSR11 і LSR14 був встановлений LSP, що проходить через LSR5, LSR6, LSR8;
- LSR11 і LSR13 був встановлений LSP, що проходить через вузли LSR5, LSR6, LSR7 (рис. 3).

Як бачимо, LSR5 не справляється з навантаженням, є втрати пакетів і зниження швидкості передачі.

## 2. Розподіл LSP з урахуванням оптимізації

Для розвантаження мінімального розрізу необхідно перенаправляти весь потік або частину потоку на альтернативний маршрут, якщо такий існує. Таким чином замість використання тільки одного LSP з традиційним алгоритмом маршрутизації ми встановлюємо два LSP для кожного потоку і отримуємо наступний дизайн LSP (рис. 4).

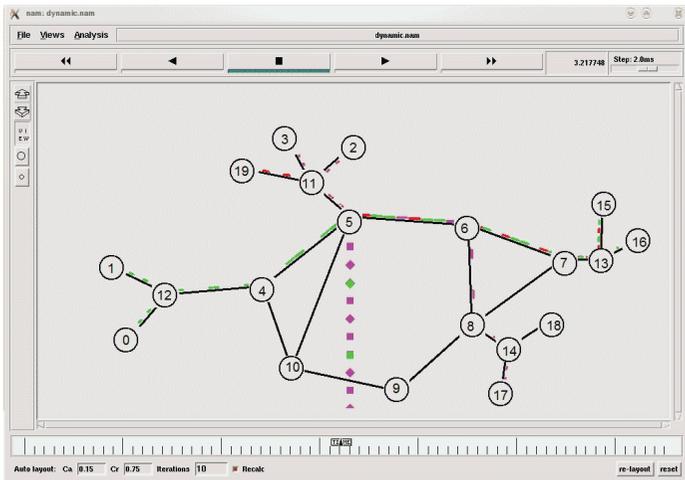


Рисунок 3 – Традиційна IP маршрутизація

Результатами моделювання є оцінка продуктивності MPLS в таких випадках:

- 1) при використанні тільки одного LSP для потоку між LSR12 і LSR13 і одного LSP між LSR11 і LSR14. Це відповідає часовому інтервалу 0-3,5 с (рис. 5), після чого дизайн LSP змінюється;
- 2) при передачі пакетів по двом LSP для потоку між LSR12 і LSR13 і по двом LSP між LSR11 і LSR14 (рис. 5).

Оцінювалася динаміка зміни продуктивності магістралі. Ця процедура

описує створення графіку, який ілюструє поведінку мережі у часі, а саме – програмує зняття через проміжки часу миттєвих значень швидкості надходження даних у визначених вузлах, що визначається у Мбіт/с. Отриманий графік представлений на рис. 5.

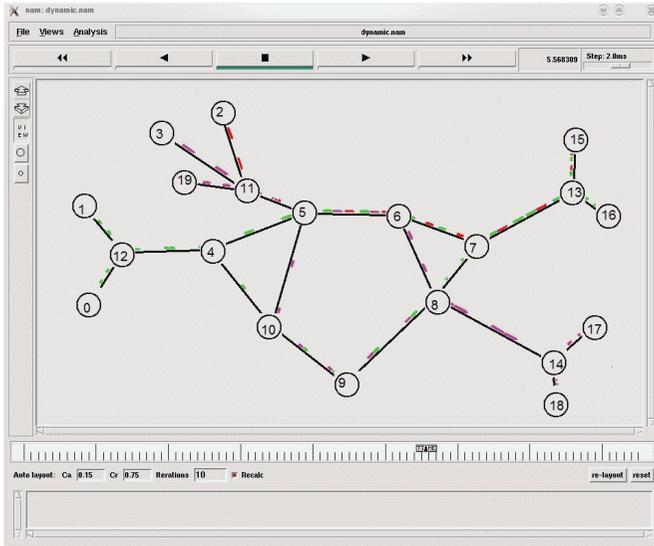


Рисунок 4 – Розподіл потоків з урахуванням оптимізації

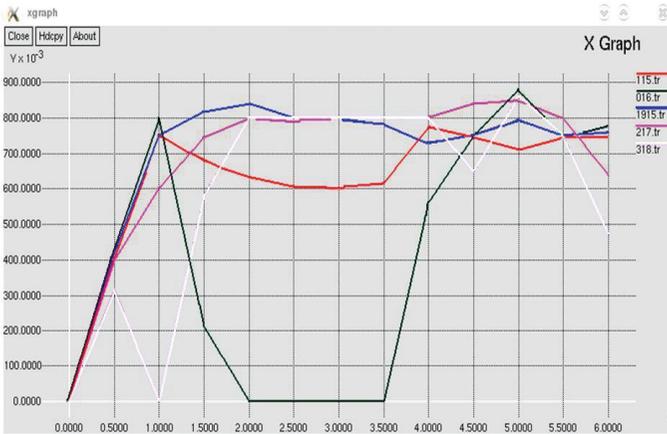


Рисунок 5 – Динаміка зміни продуктивності мережі від часу

Майже спочатку надходження трафіку у мережу спостерігається зниження продуктивності через втрату пакетів у чергах.

До 3,5 с, коли маршрути в мережі визначаються автоматично, спостеріга-

ється різке падіння обслуговування трафіка між вузлами 0 та 16, що добре видно на рис. 3. Тільки виконавши перерозподіл обох потоків, ми бачимо, що продуктивність мережі в цілому зросла і зникли перевантаження на усіх маршрутизаторах.

Оскільки інтенсивність отриманого трафіку коливається, сумарна продуктивність змінюється в границях від 2,5 до 2,9 Мбіт/с для першого сценарію і досягає 4 Мбіт/с для останнього сценарію. Тобто перерозподіл потоків істотно впливає на продуктивність мережі.

**Висновки.** Результати імітаційного моделювання продемонстрували нерациональність традиційної IP маршрутизації і переваги використання оптимізації на основі методів Traffic Engineering. Дана модель використовує дані про топологію і поведінку трафіку, тому легко може застосовуватися при проектуванні та експлуатації магістральних мереж. Подальше вдосконалення розробки може поглибити подібність моделі до реальних характеристик мереж.

**Список літератури:** 1. *Бакланов И. Г.* NGN: Принципы построения и реализации. – М: Эко-Трендз, 2008. 2. *Семенов Ю. А.* Телекоммуникационные технологии. Интернет-университет информационных технологий. – Ресурс: <http://book.itep.ru/>. 3. *Олифер В. Г., Олифер Н. А.* Искусство оптимизации трафика // Журнал сетевых решений LAN. – № 12. – 2001. 4. *Ю. П. Зайченко, Ахмед А. М. Шараджа* Анализ и оптимизация характеристик сетей MPLS по заданным показателям качества: УДК 681.324 5. *Олифер В. Г., Олифер Н. А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов: 3-е изд. – СПб.: Питер, 2006. 6. *D. Awduche, J. Malcolm, J. Agogbua, M. O'Dell, J. McManus* Requirements for traffic engineering over MPLS // RFC 2702, September 1999. 7. *D. Awduche, A. Chiu, A. Elwalid, I. Widjaja, X. Xiao* Overview and Principles of Internet Traffic Engineering // Internet informational RFC 3272, May 2002. 8. *Будьдлина Н. В., Коновалов П. А.* Разработка программного обеспечения для оптимизации мультисервисных сетей // Открытое образование, июнь 2006. 9. *Зайцев Д. А., Шинкарчук Т. Н.* Моделирование телекоммуникационных сетей в системе NS: УДК 621.39 004.7 // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2006. – № 2. 10. *Т. З. Нижарадзе* Разработка и исследование модели алгоритма динамической маршрутизации для сетей GMPLS: дисс. ... канд. техн. наук. – Вологда, 2007. 11. Network Simulator 2 // Introduction Dept. Of Computer Science SUNY Binghamton Spring, 2006. 12. *Виноградова О. Ю., Поштаренко В. М.* Оптимізація транспортного рівня NGN на основі технології MPLS // XVII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Х.: 20-22 травня 2009 р.

*Надійшла до редколегії 10.04.2012.*

**В.М.ПОШТАРЕНКО**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХП»;  
**Д.В.ПРУТСЬКИЙ**, магістр, НТУ «ХП»;  
**В.С.ГРІДІН**, магістр, НТУ «ХП»

## **ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ БЕЗПРОВІДНИХ MESH-МЕРЕЖ**

Розглянута можливість підвищення якості обслуговування в безпроводних mesh-мережах з використанням різноманітних алгоритмів маршрутизації.

Comparative analysis of routing algorithms in wireless mesh-networks. The possibility of improving the quality of care using different routing algorithms.

Проведен сравнительный анализ алгоритмов маршрутизации в беспроводных mesh-сетях. Рассмотрена возможность повышения качества обслуживания абонентов используя различные алгоритмы маршрутизации.

**Постановка проблеми.** Безпроводові mesh-мережі (WMNs) є відносно новим і перспективним напрямком збільшення покриття та підвищення продуктивності безпроводових мереж, які останнім часом привертають увагу як академічних та і галузевих структур [1]. Очікується, що mesh-мережі готові поступово частково замінити функціональність проводової мережевої інфраструктури. Важливою є проблема проектування безпроводових mesh-мереж із заданою якістю обслуговування. Такі мережі повинні підтримувати різні вимоги QoS та різноманітні сервіси обслуговування (GoS) для цього необхідно розробляти нові алгоритми гармонічної та ефективної взаємодії протоколів всіх рівнів, від фізичного до мережевого. Більша частина робіт заснована на аналізі та проектуванні WMNs протоколів на основі багаторівневого підходу. Багаторівнева архітектура забезпечує модульність і прозорість між рівнями, що забезпечує надійну масштабованість протоколів в Інтернеті і це стало де-факто архітектурою безпроводових систем. Так як повторне використання просторових спектральних частот нестійке для рівня протоколів і схильне до помилок у каналах, то робить багаторівневий підхід субоптимальним, впливаючи на загальну продуктивність мережі.

Локальна оптимізація потужності з опортуністичними методами планування може підвищити загальну пропускну здатність вихідного трансівера, але вона також може генерувати нові вузькі місця в декількох маршрутах мережі. Крім того, неточні оцінки впливу новоприйнятих запитів у працюючій мережі, можуть поставити під загрозу всю сесію QoS. Крім того, більшість існуючих робіт із крос-рівневого проектування роблять акцент на взаємодію тільки на двох рівнях, в той час як GoS (grade-of-service) концепція в mesh-мережах розглядає всі рівні. Необхідно запропонувати єдину структуру яка буде використовувати фізичні властивості каналу mesh-мережі, виконуючи інтелектуальний вибір маршруту і управління з'єднанням, а також успішно задовольняти декільком вимогам QoS.

**Аналіз літератури.** У літературі, присвяченій mesh-мережам, більше уваги приділяється питанням самоорганізації, самокеруванню і адаптації до різних вимог напрямку трафіку та змінам у мережі. Багаторівнева архітектура протоколів є одним з найбільш важливих факторів, що роблять мережу більш успішною. Проте, мало місце відсутність системного підходу до аналізу тих типів протоколів, які є або не є оптимальними. Розшарування, як оптимізація розкладу, заповнює прогалину між теоретичними методами і практичними аспектами розробки протоколу [2]. У цьому методі, різні рівні протоколу інтегровані в єдину когерентну функцію оптимізації. Ключова ідея рівнів оптимізації – розкласти завдання оптимізації на підзадачі, кожна з яких відповідає рівню протоколу та первинній функції, координація цих підзадач відповідає межі між рівнями.

З іншого боку, поділ крос-рівня на окремі конструктивні протоколи може істотно поліпшити продуктивність мережі двома способами: слабким зв'язком і тісним зв'язком. У слабкому зв'язку оптимізація здійснюється без перетину слів але з упором на одну конкретну ділянку протоколу. Параметри в інших рівнях протоколу враховують обмін інформацією щоб виконувати крос-рівневу передачу. Володіючи такою інформацією, продуктивність підвищується, тому що використовується кращий параметр (більш точний і надійний), але сам алгоритм не потребує модифікації. У тісному зв'язку лише обміну інформацією між рівнями не вистачає, а алгоритми в різних рівнях оптимізовані на виконання спільного завдання. Завдяки оптимізації по рівнях, можна очікувати, що підвищення продуктивності може бути досягнуто за рахунок обох схем. Крім того, перевагою прийняття обох схем є те, що не повністю відмовляються від прозорості між протоколами.

Дослідники зосередилися на індивідуальному стеку рівня протоколу для QoS у провідних/безпроводових мережах. У ряді робіт автори звернулися до дещо обмежених QoS алгоритмів маршрутизації провідної мережі на базі державної мережі [3,4,5,6]. Це необхідно для подолання труднощів забезпечення оптимальних маршрутів [7]. QoS алгоритми маршрутизації для безпроводових однорангових мереж були розглянуті [8-12]. Однак вони враховували масові затримки, або тільки час обробки пакетів, або просто розраховували пропускну здатність слота, яка не використовувала опортуністичне посилення планування в швидко затухаючих каналах.

Питання управління доступом для забезпечення QoS гетерогенного трафіку в WMNs розглянуто в роботах [13, 14]. В роботі [15] спільне централізоване планування і розподіл тимчасових інтервалів на основі алгоритму управління доступом пропонується для WiMAX мережі. Комплексна системи маршрутизації і контролю доступу IEEE 802.16 для розподілених mesh-мереж була розглянута у [16]. Для ad-hoc мереж запропонований AODV протокол маршрутизації на основі управління доступом, однак він блокує перевантажений запитами потік у процесі вивчення маршруту [17].

**Метою статті** є обґрунтування алгоритму маршрутизації, який забезпечує підвищення якості обслуговування у безпроводових mesh-мережах.

**Алгоритм маршрутизації.** Проблема забезпечення оптимальних маршрутів, які викликають кілька обмежень QoS була доведена в [5]. З метою полегшення доставки та обміну інформацією (слабо зв'язаних) між РНУ, МАС і мережевого рівня, розглянуті узагальнені утиліти QoS, що дає єдину платформу для розробки поперечного рівня. Враховуючи сесії  $q$  з трьома вимогами QoS ( $D_q^r$ ), ЕТЕ затримки, пропускну здатність та PER, введемо «QoS відключення відносини»,  $R$ , що зазнає кожна QoS метрика, яка є мірою на вимогу. Відношення  $R$  для кожної вимоги QoS можна визначити наступним чином:

1.  $R_k^D$

ЕТЕ затримки пакетів для відключення маршруту  $\pi_{sq}^k$  визначається як фактичний вимір затримки,  $\sum_{(i,j) \in \pi_{sq}^k} D_{ij}^a$ , на вимогу затримки QoS  $D_q^r$ ,

$$R_k^D(q) = \frac{\sum_{(i,j) \in \pi_{sq}^k} D_{ij}^a}{(1 - \beta_D) D_q^r}. \quad (1)$$

2.  $R_k^T$

Пропускна відключення формулюється як співвідношення між пропускну вимогою  $T_q^r$ , і фактичним пропускну посиланням вузького місця,  $\min_{(i,j) \in \pi_{sq}^k} T_{ij}^a$ , мінімум пропускну здатності однієї точки по маршруту  $\pi_{sq}^k$ ,

$$R_k^T(q) = \frac{(1 - \beta_D) T_q^r}{\min_{(i,j) \in \pi_{sq}^k} T_{ij}^a}. \quad (2)$$

3.  $R_k^E$

PER відключення визначається як множення всіх хоп-помилки  $1 - \prod_{(i,j) \in \pi_{sq}^k} (1 - E_{ij}^a)$ , через PER вимоги  $E_q^r$  так як це обмежить мультиплікаційність,

$$R_k^E(q) = \frac{1 - \prod_{(i,j) \in \pi_{sq}^k} (1 - E_{ij}^a)}{(1 - \beta_E) E_q^r}. \quad (3)$$

Фактори резервування ресурсів мережі вводяться як  $\beta_D$ ,  $\beta_T$  і  $\beta_E$  для затримки, пропускну здатності та PER відповідно. Іншими словами  $\beta_i$  представляє додаткові ресурси, які ми залишаємо за рамки вимог QoS.  $\beta_i$  є вільним параметром, який може бути визначено та змінено оператором мережі /адміністратором на основі вимог до мережі. Деякі результати і дискусії про вплив параметрів  $\beta_i$  на ймовірність відключення QoS, частотного ресурсу і ймовірність блокування сесія наведені в [18].

Оскільки сесія повинна виконати ряд вимог QoS, шлюз буде можливо використати тоді і тільки тоді, коли всі співвідношення відключення визначено менше за 1,

$$(R_k^D(q), R_k^T(q)) \leq 1. \quad (4)$$

Тим не менш, деякі обмеження не можуть бути критичним для деяких програм (наприклад, широкосмугові послуги передачі даних можуть бути не чутливі до затримок). Для того, щоб ефективно справитися з цією проблемою ми введемо функцію виправлення  $I_p$ , де  $p = D, T, E$ , у вигляді

**QoS вибір маршруту.** Мультиобмежені «QoS КПД» в маршруті  $\pi_{sq}^k$  можуть бути сформульовані як

$$U_{sg}^k = \max [I_D R_k^D(q), I_T R_k^T(q), I_E R_k^E(q)]. \quad (5)$$

Пропоноване рішення багаточільової функцію маршрутизації необхідно для того щоб прийняти оптимальне рішення.

$$S(k^*) = \min U_{sg}^k. \quad (6)$$

Де маршрут  $\pi_{sq}^{k^*}$ , обраний. Іншими словами, вибирається маршрут з мінімальною загальною ймовірністю відключення QoS.

**Висновки.** Розглянутий алгоритм маршрутизації може вирішити ряд питань маршрутизації у mesh-мережах. Завдяки даному алгоритму можливо значно підвищити якість обслуговування абонентів.

**Список літератури:** 1. Zhang Q., Zhang Y.Q. Cross-layer design for QoS support in multihop wireless networks // The Proceedings of IEEE 96(1) 64-76 (2008). 2. Chiang M., Low S.H., Calderbank A.R., Doyle J.C. Layering as optimization decomposition: A mathematical theory of network architectures // The Proceedings of IEEE 95(1), 255-312 (2007). 3. Yuan X. Heuristic algorithms for multiconstrained quality-of-service routing // IEEE/ACM Trans. on Networking 10(2), 244-256 (2002). 4. Jaffe J.M. Algorithms for finding paths with multiple constraints // IEEE Networks 14, 95-116 (1984). 5. Miegheem P.V., Kuipers F.A. On the complexity of qos routing // Computer Communications 26(4), 376-387 (2003). 6. Korkmaz T., Krunz M. Bandwidth-delay constrained path selection under inaccurate state information // IEEE/ACM Trans. on Networking 11(3), 384-398 (2003). 7. Wang Z., Crowcroft J. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications // IEEE JSAC 14(7), 1228-1234 (1996). 8. Zhang Y., Gulliver T. Quality of service for ad hoc on-demand distance vector routing // Proceedings of WiMob'2005. 2005. – Vol. 3. – PP. 192-196. 9. Lin C.R., Liu J. QoS routing in ad hoc wireless networks // IEEE JSAC 17(8), 1426-1438 (1999). 10. Lin C.R. On-demand QoS routing in multihop mobile networks // Proceedings of IEEE INFOCOM 2001. – 2001. – Vol. 3. – PP. 1735-1744. 11. Felemban E., Lee C.G., Boder R., Vural S. Probabilistic qos guarantee in reliability and timeliness domains in wireless sensor networks // Proceedings of IEEE INFOCOM 2005 (2005). 12. Draves R., Padhye J., Zill B. Comparisons of routing metrics for static multi-hop wireless networks // Proceedings of ACM Annual Conf. Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM). – 2004. – PP. 133-144. 13. Seungjoon L., Narlikar G., Pal M., Wilfong G., Zhang L. Admission control for multihop wireless backhaul networks with QoS support // Proceedings of IEEE WCNC. – 2006. – Vol. 1. – PP. 92-97. 14. Herms A., Ivanov S., Lukas G. Precise admission control for bandwidth reservation in wireless mesh networks // Proceedings of IEEE MASS 2007. – 2007. – PP. 1-3. 15. Ghosh D., Gupta A., Mohapatra P. Admission control and interference-aware scheduling in multi-hop wimax networks // Proceedings of IEEE MASS 2007. – 2007. – PP. 1-9. 16. Tsai T.C., Wang C.Y. Routing and admission control in IEEE 802.16 distributed mesh networks // Proceedings of IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN '07). – 2007. – PP. 1-5. 17. Su S.L., Su Y.W., Jung J.Y. A novel QoS admission control for ad hoc networks // Proceedings of IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN '07). – 2007. – PP. 4193-4197. 18. Lui C.H., Gkelias A., Leung K.K F cross-layer framework of QoS routing and distributed scheduling for mesh networks // Proceedings of IEEE VTC 2008 Spring. Singapore (2008).

Надійшла до редколегії 16.03.2012.

**В.В.РУДАКОВ**, д-р техн. наук, проф., гл. науч.сотр., НТУ «ХПИ»;  
**В.П.КАСАТКИН**, студент, НТУ «ХПИ»

## **УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С ЛАВСАНОВЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ**

Наведені результати ресурсних випробувань секцій високовольтних імпульсних конденсаторів з лавсановим діелектриком, що просочений трансформаторним маслом, в імпульсному режимі. Проведено оцінку питомої енергії.

The results of the resource test of high-tension section of pulsed capacitor with lavsan dielectric, imbrued with transformer mask in pulsed mode are shown. The estimation of specific energy are made.

Приведены результаты ресурсных испытаний секций высоковольтных импульсных конденсаторов с лавсановым диэлектриком, пропитанным трансформаторным маслом в импульсном режиме. Проведена оценка удельной энергии.

**Постановка задачи.** Наряду с исследованиями по улучшению конструкции конденсаторов с бумажно-касторовым диэлектриком интенсивно развиваются работы по созданию чисто пленочных конденсаторов [1,2].

Прогресс в области создания пленочных импульсных высоковольтных конденсаторов привел к сокращению доли выпуска конденсаторов с бумажно-касторовой пропиткой. В тоже время приводимые в соответственных литературных источниках данные по ресурсу образцов секций пленочных импульсных конденсаторов дают завышенные значения по отношению к декларируемому ресурсу, изготовленных на основе таких секций конденсаторов [2,3]. Лучшие показатели по удельной энергии достигнуты для конденсаторов с полиэтилентерефталатным диэлектриком (лавсаном), пропитанным ксиллфенилэтаном [1]. Однако, эта пропитывающая жидкость может вызывать аллергические реакции, а из традиционно применяемых касторового масла и нефтяного масла лучшей представляется трансформаторное масло, что отражено в работах при исследовании пропитанной полипропиленовой изоляции [2,4].

**Цель работы.** Проведение поисковых исследований и определение ресурса секций импульсных высоковольтных конденсаторов с лавсановым диэлектриком, пропитанным трансформаторным маслом, и предназначенных для использования в составе генераторов передвижных электролабораторий для определения мест повреждения кабелей.

**Конструкция секций и методика проведения испытаний.** Проведены ресурсные испытания секций импульсных конденсаторов с двухслойным, трехслойным и четырехслойным лавсановым диэлектриком (толщина одного слоя пленки ПЭТ 15 мкм). Общая толщина диэлектрика составила соответственно 30мкм, 45 мкм и 60мкм. Обкладки выполнены из алюминиевой фольги длиной 2 м, толщиной – 9 мкм и шириной активной части в секции 160 мм. Образцы, залиты в вакууме сушенным трансформаторным маслом Т-1500 без

предварительной сушки лавсанового диэлектрика. Испытания в импульсном режиме проводились по схеме, моделирующей условия работы импульсного конденсатора в установке для обнаружения мест повреждения кабелей (рис.1).

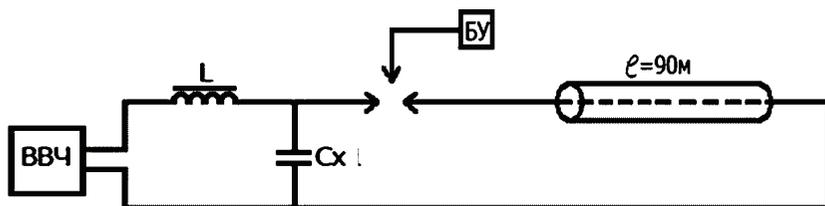


Рисунок 1 – Электрическая схема испытаний установки: ВВЧ – высоковольтный блок заряда; L – дроссель; Р – разрядник; Сх – испытываемый образец; L = 90 м – высоковольтный кабель ПВВЕВ-60-3.5 длиной 90 м; БУ – блок управления

На рис. 2 приведен экспериментальный испытательный стенд, включающий испытательную ячейку 1 с образцами секций, измерительный трансформатор 2, делитель напряжения 3, испытательный высоковольтный кабель 4, механический разрядник 5, высоковольтный трансформатор 6, блок управления 7.

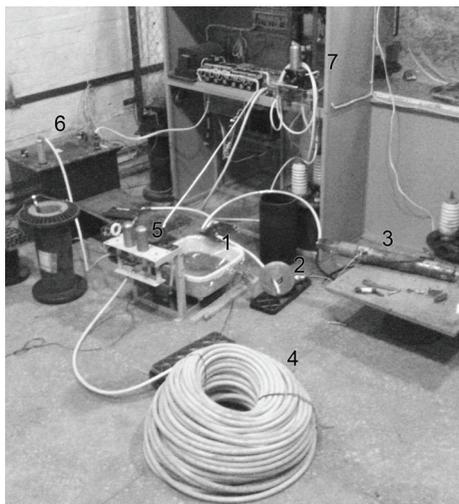


Рисунок 2 – Экспериментальный испытательный стенд

Секции для испытаний выполнены плоскомотанными. После намотки секции набраны в группы таким образом, чтобы емкость каждой группы находилась в диапазоне  $0,5 \pm 1$  мкФ, залиты трансформаторным маслом в вакууме без предварительной термовакuumной обработки. Испытаны 6 групп образ-

цов: одна группа (А) из двухслойных секций емкостью 0,73 мкФ , 2 группы емкостью 0,8мкФ каждая (В1 и В2) из трехслойных секций, двух групп четырехслойных секций емкостью 0,49мкФ каждая (Д1 и Д2), и группы (Д3) емкостью 1,08мкФ четырехслойных секций из двух подгрупп, содержащих параллельно соединенные секции каждая, но включенных при испытаниях последовательно. Частота следования импульсов составила  $f = 0,8$  Гц, а частота разрядного тока  $F = 20$  кГц. При испытаниях контролировалось зарядное напряжение на емкости  $C_x$  с помощью делителя напряжения и разрядный ток с помощью трансформатора тока и осциллографа. Декремент колебаний составил  $\Delta = 1,7 \div 2$ . Группа А1 испытывалась при напряженности электрического поля 166 кВ/мм. Ресурс составил 2330 циклов заряд-разряд. Группа В1 испытывалась в режиме подъема зарядного напряжения ступенями таким образом, чтобы уровни напряженности на каждой ступени составили: 130кВ/мм в режиме аperiodического разряда (2300 циклов заряд-разряд), в основном режиме при декременте колебаний 1,7 при 130 кВ/мм (10600 циклов), 140кВ/мм (4420), 150 кВ/мм (700 циклов), и пробой при подъеме напряженности до 180 кВ/мм. Вторая группа В2 испытывалась в режиме: 110кВ/мм, 130 кВ/мм, 140кВ/мм , 150 кВ/мм(по 700 циклов на каждой ступени), 160 кВ/мм (5600 циклов), 170 кВ/мм (330циклов и пробой). Группа Д1 и Д2 , соединенные параллельно, выдержали 3240 циклов при напряженности 140кВ/мм и 2800 циклов при напряженности 150 кВ/мм, после чего группа Д1 пробилась. Группа Д2 после этого проработала 6721 циклов при напряженности 140кВ/мм, затем 1410 циклов при напряженности 150 кВ/мм и далее после 2585 циклов при напряженности 140 кВ/мм пробилась. Средний срок службы, приведенный к напряженности поля 110 кВ/мм при показателе степени в «формуле жизни», равном 6, для всех групп секций приведен в таблице.

Средний срок службы, приведенный к напряженности поля 110 кВ/мм

Тип группы	Ресурс, циклы заряд-разряд ( $E_{расч} = 130кВ/мм$ )	Ресурс, циклы заряд-разряд ( $E_{расч} = 110кВ/мм$ )
А	8100	22070
В1	19140	52150
В2	24810	67600
Д1	11690	31850
Д2	29540	80485
Д3	25510	69500

Перед испытаниями измерены емкость  $C_x$  и тангенс угла диэлектрических потерь образцов  $\tan \delta$ . Выборочно определены зависимости измерения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости от напряжения  $U$  (50 Гц) с помощью устройства ИПИ-10-МИ в процессе проведения испытаний [5]. При измерении испытания прерывались на период измерения. Емкость при изменении напряжения  $U$  практически не изменялась. Значения тангенса угла диэлектрических потерь зависели только от уровня напряжения, при котором производились измерения, но не зависели от времени старения вплоть до пробоя. Так при из-

мерении  $\text{tg } \delta$  группы ДЗ в процессе испытаний после наработки ресурса при напряженности электрического поля 130 кВ/мм значения  $\text{tg } \delta$  составили при подаче напряжения 1кВ, 2 кВ и 3кВ соответственно 0,00205; 0,00233; 0,00301. После последующей наработки в импульсном режиме при 140 кВ/мм значения  $\text{tg } \delta$  составили 0,00201; 0,0022; 0,00335. А при 150 кВ/мм – 0,00235; 0,00252; 0,0039. Перед испытаниями значения  $\text{tg } \delta$  составили 0,0011; 0,00117; 0,00192. Таким образом, по величине тангенса угла диэлектрических потерь, измеренному при уровнях действующего напряжения до 3кВ, невозможно оценить степень старения данного вида изоляции.

Анализ таблицы показывает, что при сроке службы  $1 \cdot 10^4$  и более циклов заряд-разряд удельная энергия 3-4 слойных (при толщине 45-60мкм) конденсаторов составит  $240 \text{ Дж/дм}^3$  ( $0,5 \epsilon \epsilon_0 E^2$ , для лавсана  $\epsilon=3,2$ ). Так как в реальных конструкциях объем активного диэлектрика составляет в среднем 50% объема конденсатора, то значение удельной энергии конденсатора ожидается на уровне  $120 \text{ Дж/дм}^3$ . Это значение соответствует удельной энергии лучших образцов конденсаторов, выпускаемых серийно и предназначенных для работы в режиме слабозатухающих колебательных разрядов при ресурсе  $2 \cdot 10^4$  циклов заряд-разряд. Положительным является значительное сокращение цикла изготовления конденсаторов за счет исключения цикла сушки, а также применение дешевого широко распространенного трансформаторного масла.

Проведены также определительные испытания на переменном напряжении 3-х слойных секций при напряженности электрического поля, не превышающей значения, соответствующего началу интенсивного роста тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg} \delta$ . Данное значение испытательной напряженности электрического поля определено экспериментально с помощью измерителя  $\text{tg} \delta$  ИПИ-10 [2], а результаты измерений  $\text{tg } \delta$  представлены на рис. 3. Измерения проведены на частоте переменного тока 50 Гц. .

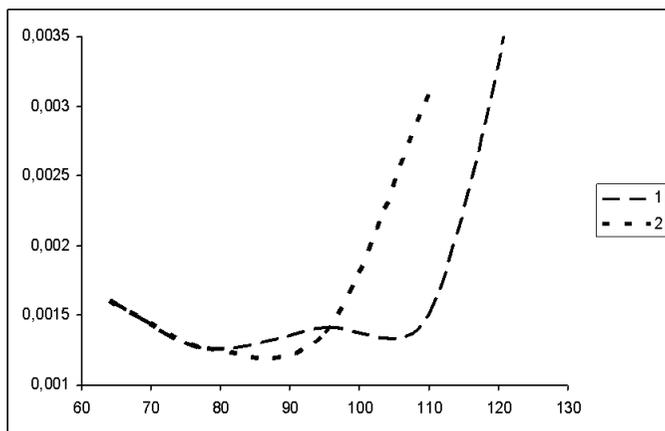


Рисунок 3 – Зависимость  $\text{tg} \delta$  от амплитудного значения напряженности электрического поля

Кривая 1 получена при проведении замеров  $tg \delta$  в начале каждого 20 минутного интервала нахождения образца под переменным напряжением, а кривая 2 – в конце каждого 20 минутного интервала. Рабочая напряженность на каждом временном интервале измерений увеличивалась по отношению к значению напряженности на предшествующем временном интервале. При  $E = 125$  кВ/мм произошел пробой образца через 3 минуты после подачи напряжения. Рост  $tg \delta$  начинается с напряженности 110 кВ/мм. Как правило, резкое увеличение  $tg \delta$  связано с развитием ионизационных процессов. Поэтому принимаем, что при  $E \leq 110$  кВ/мм показатель степени  $n$  будет равен 6 в формуле обратной степенной зависимости ресурса от напряженности электрического поля, что справедливо для силовых конденсаторов, работающих при относительно низких рабочих напряженностях электрического поля. При дальнейшем увеличении  $E$  показатель степени  $n$  может увеличиваться до  $8 \div 10$  [6].

### Выводы

1. Результаты пробных испытаний на ресурс показывают, что возможно создание конденсаторов с лавсановым диэлектриком из 3-4 слоев пятнадцатимикронной пленки, пропитанным трансформаторным маслом.

2. Заметное увеличение  $tg \delta$  происходит при напряженности поля 110 кВ/мм, выше которого необходимо учитывать возможное увеличение показателя степени в формуле «жизни» более 6.

3. Удельная энергия конденсаторов, соответствующая ресурсу  $10^4$  циклов заряд-разряд, может достигать значений 120 Дж/дм<sup>3</sup> при 50 % заполнения объема конденсатора активным диэлектриком.

**Список литературы:** 1. *Ермилов И.В.* Высоковольтные импульсные конденсаторы с полимерной изоляцией // *Электричество*. – 2009. – № 9. – С. 73-79. 2. *Рудаков В.В., Кравченко Ю. В.* Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной нефтяным маслом, в импульсном режиме // *Вісник НТУ «ХПІ» «Техніка і електрофізика високих напруг»*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2007. – № 20. – С. 167-174. 3. *Гребенников И.Ю., Гуноко В.И., Дмитришин А.А. и др.* Исследования зависимости ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком от режима эксплуатации // *Электротехника*. – 2006. – № 6. – С. 38-41. 4. *В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко, Д.А.Доценко* Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной касторовым маслом, в импульсном режиме // *Вісник НТУ «ХПІ» «Техніка і електрофізика високих напруг»*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2006. – № 37. – С. 113-118. 5. *Бутко С.М., Кравченко В.П., Рудаков В.В., Свиридок С.Н.* Электрическая прочность конденсаторной изоляции с повышенным содержанием полипропиленовой пленки // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – Х.: НТУ «ХПИ». – № 16. – 2011. – С. 35-39. 6. *Кучинский Г.С.* Высоковольтные импульсные конденсаторы. – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1979. – 224с

*Поступила в редколлегию 04.04.2012.*

**A.G.YUSHCHENKO**, Ph.D., prof. of «SI» Department, NTU «KhPI»;  
**D.B.MAMEDOV**, master's degree candidates, NTU «KhPI»

## **INTELLECTUAL CAD OF MM WAVES WDR FILTERS WITH INCREASED STOP BAND ATTENUATION**

У статті викладено фізичні принципи розробки оригінальної інтелектуальної САПР триланкових ХДР-фільтрів з розширеною областю позасмугового затухання. Проаналізовано електродинамічні параметри частково заповнених резонаторів з квазі-  $H_{101}$  - і квазі-  $H_{102}$  модами, які впливають на їх взаємну частотну відстань. Результати конструювання фільтрів відповідають новітнім стандартам ECMA-387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11ad.

Physical principles of the original intellectual CAD development for three-tier WDR filters with increased stop band attenuation are presented in the article. The electrodynamic parameters of the partly filled resonators with quasi-  $H_{101}$  and quasi-  $H_{102}$  eigenmodes, which influencing on their frequency separation are analysed. The results of filters designing, proper to the recent standards ECMA-387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11ad, are presented.

В статье представлены физические принципы разработки оригинальной интеллектуальной САПР трехзвенных ВДР фильтров с расширенной областью внеполосного подавления. Проанализированы электродинамические параметры частично заполненных резонаторов с квази-  $H_{101}$  - и квази-  $H_{102}$  модами, которые оказывают влияние на их взаимное частотное расстояние. Результаты конструирования фильтров соответствуют новейшим стандартам ECMA-387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11ad.

### **Introduction**

Recently produced standardization of ranges 3-5 millimetre waves allows to expect dynamic growth of high – quality radio- telecommunication networks of information relaying [1-3]. According to this there is a necessity in development of the proper high-quality millimetre wave components base. Telecommunications wireless technology requires different types of band pass filters for selections and compactions of information channels. It is clear that the electromagnetic situation on the air requires constant improvement of receiver protection against electromagnetic interference as well as more strict requirements to transmitters, which are the sources of the interference. Traditionally these problems are solved using passive band filters mounted on receiver inputs and transmitter outputs. Various filters with different pass bands (or suppressed frequency bands) are used in metering apparatus while the most high-quality ones serve for frequency stabilization in oscillators. Among the known micro – and millimetre wave filters, the designs based on leucosapphire and quartz partially filled waveguide-dielectric resonators (WDR) pleased into cut-off waveguides are distinguished due to their general quality parameters, such as high unloaded Q's, sparse spectrum of parasitic eigenmodes and usable level of transmitted power [4,5]. The partial filling by this high Q dielectric allows to increase to one order the unloaded Q of the resonator. Resonators partially

filled in the waveguide H-plane, differ from E-plane ones in having a sparser spectrum of parasitic eigenmodes and somewhat lower unloaded Qs. Therefore they are perspective for development of filters with increased stop band attenuation, application of which allows to solve problems of electromagnetic compatibility of the receiving-passing telecommunications modules. Formulas for the calculation of eigen  $quasi-H_{p0s}$  eigenmodes of dielectric parallelepiped partly filling a cut-off waveguide on a width are shown in [4], the scattering problem solution methods of  $H_{10}$ -wave on the periodic system of resonators are described, and good accordance of results of calculation and experiment is demonstrated. In this article we will perform new results both as on spectrum optimization of quasi- $H_{101}$  and quasi- $H_{102}$  eigenmodes and filters designing, which proper to new standards of millimetre range on the basis of the noted theoretical solutions. As optimization of filters on a spectrum is a tough problem, intellectual CAD developed previously for LM mode was modernized for its realization [6].

### Spectrum dynamics analysis of quasi- $H_{101}$ and quasi- $H_{102}$ eigenmodes

The design of the filter is shown in Fig. 1. Fig. 2 shows the quasi- $H_{101}$  and quasi- $H_{102}$  eigenmodes frequency separation calculated in different frequency ranges; increase in the width of cut-off waveguide was limited to decrease in the resonator length to manufacturing size of 0.4 mm. the end of stage option with a maximum value of the frequency separation is selected. At the second - construction of three-tier filter is optimized, as the initial parameters one-tier optimization results are used.

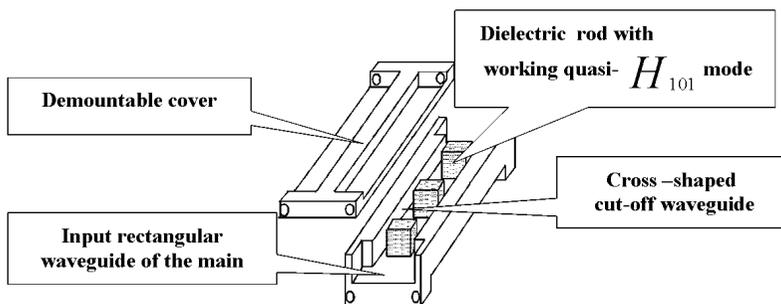


Figure 1 – The three-tier microwave WRD quasi- $H_{101}$  filter with increased stop band attenuation design [7]

As follows from the dependencies, as well as those obtained in [4], the higher the dielectric permittivity of the resonator and, obviously, the less its length at a fixed operating frequency the higher is rarefaction of the eigenmodes spectrum.

Physically it explains that at the edges of the resonator intensity of the electric

field of the quasi- $H_{102}$  higher than quasi- $H_{101}$  eigenmodes, therefore, the frequency adjustment of the first one, higher than of the second one when the length changes. It's important to note that the same value of the resonator length can be obtained for different ratios of dielectric permittivity and width of cut-off waveguide. However, the realization of ultra-wideband waveguide filters with high cut-off waveguides is difficult because the values of loaded Q of the resonators are quite high even at zero values of the input cut-off section. These electromagnetic features of the WDR at cut-off waveguides make this task actual of the developing their computer-aided design systems to ensure optimization of designs on various parameters.

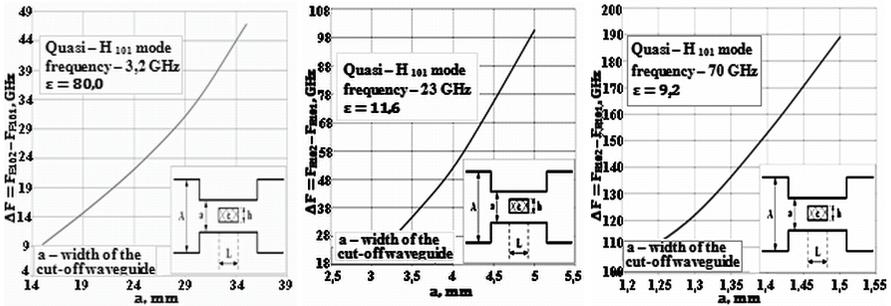


Figure 2 – Dynamics of quasi- $H_{101}$  and quasi- $H_{102}$  eigenmodes for fixed frequencies: 3.2, 23 and 70 GHz, accordingly

### Intellectual CAD WDR filters with increased stop band attenuations results

Designs of three-tier WDR filters with increased stop band attenuations were calculated by modified intellectual CAD system [6]. On the basis of formalized physical knowledge about the behaviour of coupled resonators, the original CAD system analyses electromagnetic signal passing through a filter structure and makes decisions gradually approaching the optimal filter design through a series of changes in its geometry. Optimization of the filter design is carried out in two stages. At the first stage, the lengths of the resonators are calculated for various combinations of dielectric permittivity and widths of the cut-off waveguides, frequency separation between working quasi- $H_{101}$  and parasitic quasi- $H_{102}$  eigenmodes are also fixed.

At the filter design stages are illustrated below.

Fig. 3 demonstrates the concluding stage calculating the length of the central resonator with quasi- $H_{101}$  mode under working frequency of 60 GHz. Upper frequency response image shows resonance splash proper to the current geometrical parameters of structure, low – frequency separation between eigenmodes quasi- $H_{101}$  (left splash) and quasi- $H_{102}$  (right splash). Figure 4 demonstrates the con-

cluding stage calculating the three-tier 60 GHz- filter design with quasi- $H_{101}$  mode. The upper figure of the intellectual CAD menu shows bandwidth of the filter and the lower - frequency separation between its working bandwidth (left) and parasitic one (right).

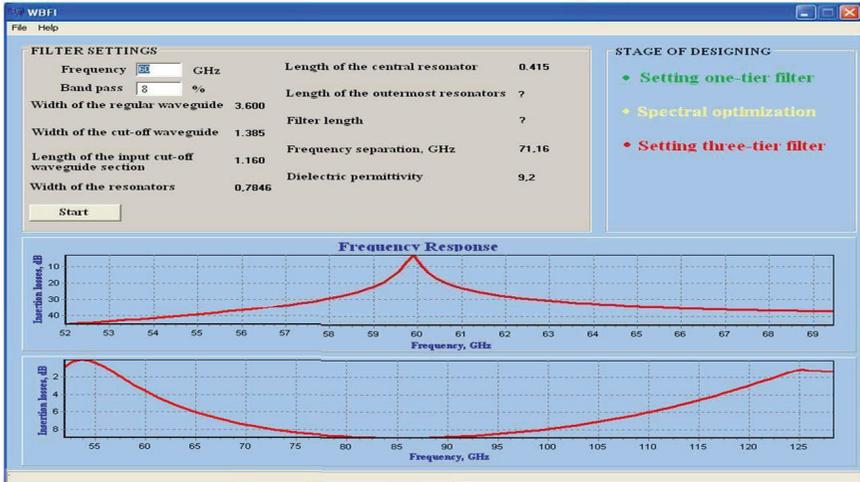


Figure 3 – The result of the spectral optimization of one-tier filter at a frequency of 60 GHz

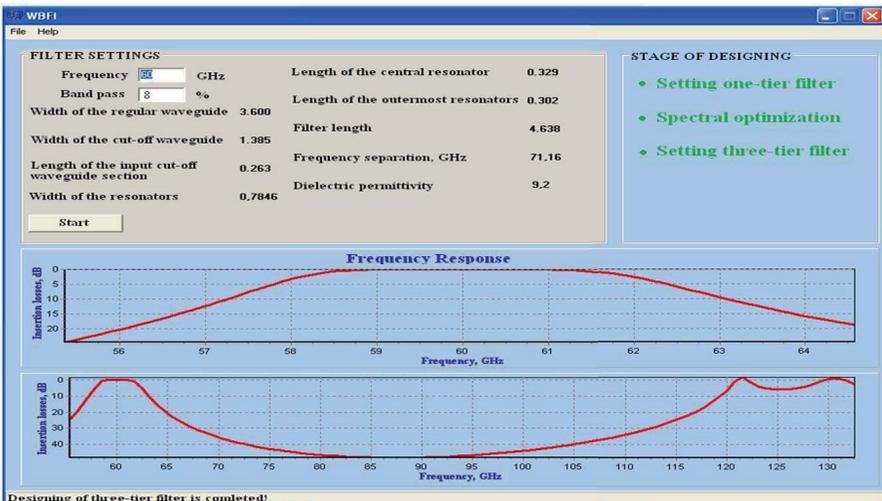


Figure 4 – The intellectual CAD system results of three-tier 60 GHz- filter design with spectral optimization

Analogically, Fig. 5 and Fig.6 show the results of the filters designing on the frequencies 83.5 and 73.5 GHz, respectively.

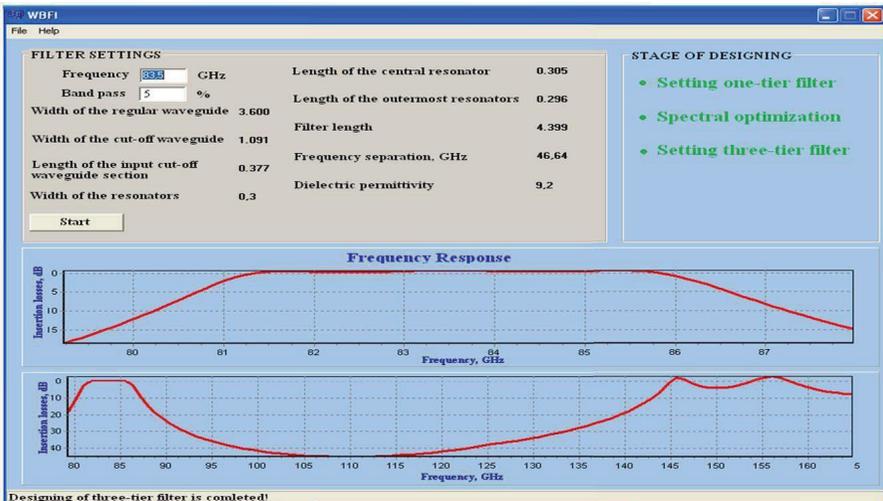


Figure 5 – The intellectual CAD system results of three-tier 83.5 GHz- filter design with spectral optimization

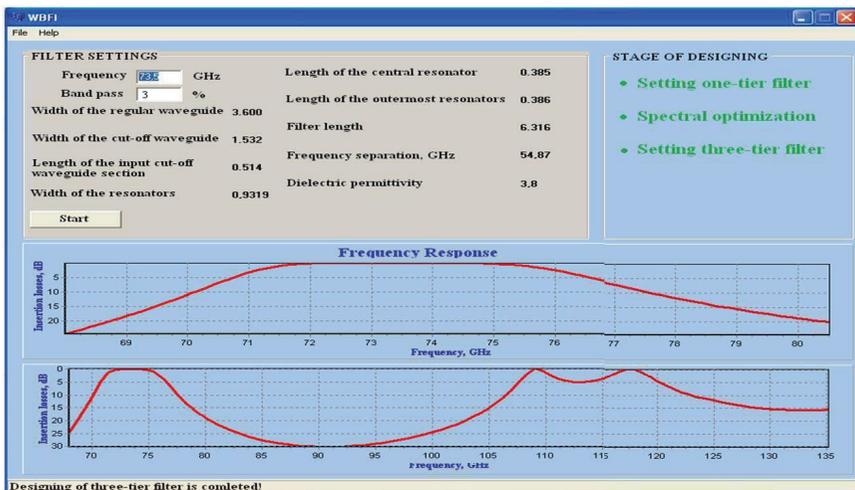


Figure 6a – The comparative characteristic of the frequency response of three-tier 73.5 GHz filter with band pass 3%

Fig. 6 shows the comparative characteristics of the frequency response of three-tier 73.5 GHz filters with different widths of band pass: 3, 7 and 20%, accordingly. The comparative analysis shows that frequency separation between the work-

ing band pass of and parasite did not change dramatically while level of stop band suppression, and accordingly, steepness of the high-frequency slope response are notably diminished with the increase of band pass width.

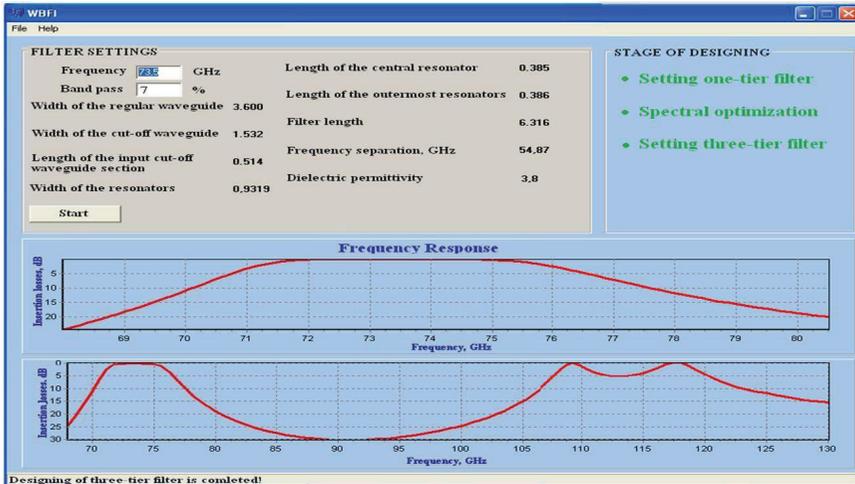


Figure 6b – The comparative characteristic of the frequency response of three-tier 73.5 GHz filter with band pass 7%

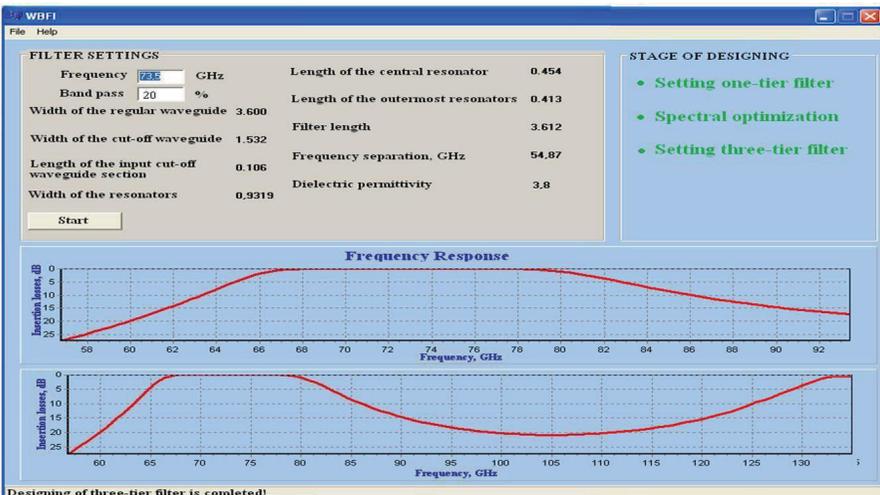
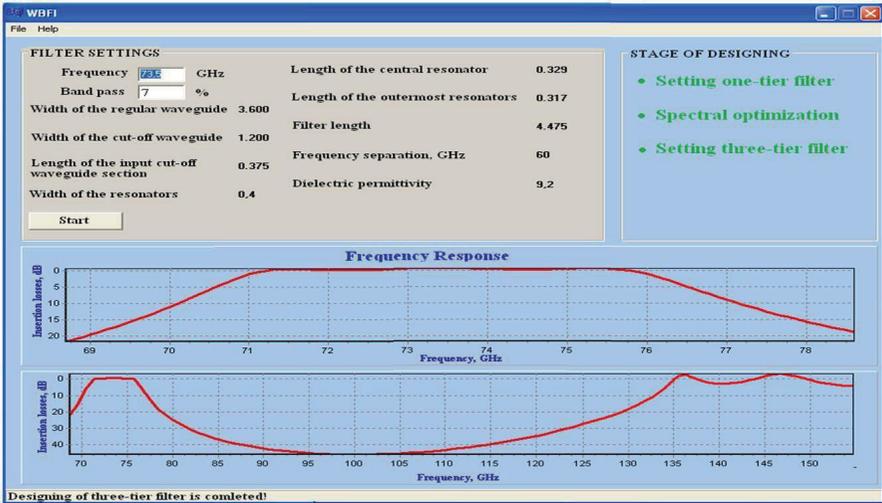


Figure 6c – The comparative characteristic of the frequency response of three-tier 73.5 GHz filter with band pass: 20%

On the Fig. 7 the results of such filter intellectual CAD system designing with more high value of dielectric permeability  $\epsilon = 9.2$ , instead of  $\epsilon = 3.8$  are represented;

here the technological sizes of resonators are succeeded to be saved due to narrowing of cut-off waveguide. The comparison of this filter response with similar previous (Fig. 7, band pass – 7 %,  $\epsilon = 3.8$ ) shows that the last variant appears to be preferable both on stop band suppression and on the steepness of response slopes.



Figures 7 – The intellectual CAD system results of three-tier 73.5 GHz- filter design with spectral optimization

## Conclusions

Filters based on partially filled waveguide-dielectric resonators surpass in many quality aspects the well-known analogues, that is why they have a good chance of being widely used in new generation of receiver - transmitter wireless devices of the millimetre wave band. WDR filters can have the microstrip input \ output coupling elements and be adapted to plane technologies. It also has some perspectives to use quasi- $H_{10n}$  resonators because their frequencies do not depend on the height of waveguide screen. In this aspect they are attractive for creation of a new generation telecommunications devices of millimetre range waves.

High speed of calculations is the distinctive feature of the intellectual system from the known ones, practically every successive step in calculations changes frequency response in the direction of all greater approximations to optimum, at the chosen values of dielectric permeability and width of cut-off waveguide. Thus, the system creates a base from the calculated variants of filters, giving possibility of manifest the best, as per the chosen criterion; in our case it is the maximal band pass at an erratical response no more than 0.2 dB.

The efficiency of intellectual CAD depends only on the accuracy of the analysis problem solution and the exactness with which the application conditions of the rules applied match the data. Therefore it is high enough: the errors are less than 2%

in both cases, i.e. for frequency and insertions losses.

Thus, the modified original intellectual CAD system effectively solves a problem of designing optimal three-tier wide band microwave WDR quasi- $H_{101}$  filters with spectral optimization and may be considered as a prototype for designing filters with more tiers.

**References:** **1.** Millimeter wave technology in wireless PAN, LAN, and MAN / Xiao, Shao-Qiu et al. CRC Press, 2008. **2.** IEEE Std 802.15.3c-2009. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). Amendment 2: Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension. – IEEE, 12 October 2009. **3.** IEEE Std 802.15.3 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE, 29 September 2003. **4.** *A.G.Yushchenko* Waveguide-dielectric filters based on leucosapphire and quartz monocrystals // SPI's Int. Symp. on «Voice, Video and Data Communications». – V. 3232. – 1997. – PP.73-79. doi:10.1117/12.301020. **5.** *A.G.Yushchenko* High unloaded-Qs WDR filters designing // International Journal of Infrared and Millimeters Waves. – Vol. 22, no. 12. – 2001. – PP. 1831-1836. doi:10.1023/A:1015031802727. **6.** *A.Yushchenko, D.Mamedov, D.Zaytsev* Intellectual CAD for Three-Tier Wide Band WDR Filters // Wireless Engineering and Technology. – Vol. 3 No. 1. – 2012. – PP. 30-35. doi:10.4236/wet.2012.31005. **7.** *A.G.Yushchenko* et al. Microwave Filter // Buluten Izobreteniy, (in Russian), Patent of Russia Federation №.2040080, 1995.

*Надійшла до редколегії 12.04.2012.*

## ЗМІСТ

<b>М.И.Баранов, В.М.Зиньковский, Ю.П.Зябко, Н.Н.Игнатенко, В.О.Лысенко</b> Некоторые новые электротехнологические возможности высоковольтной импульсной техники НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»	3
<b>А.Д.Блащенко, Н.П.Головина</b> Выбор параметров электродной системы, обеспечивающих минимально возможные предпробивные потери энергии	11
<b>Л.З.Богуславский, Л.Н.Мирошниченко, В.В.Диордийчук, Н.С.Ярошинский, А.В.Ковальчук, А.Ф.Папырин</b> Интенсификация процессов дозарядки разноимпедансной пыли в комплексных системах газоочистки	18
<b>Л.З.Богуславский, Н.С.Назарова, Л.Е.Овчинникова, С.С.Козырев, С.Б.Приходько</b> Методика построения аналитической модели закона распределения размера наночастиц углерода, полученных электроразрядным способом	24
<b>Р.К.Борисов</b> О выносе высокого потенциала при коротком замыкании на землю на питающем центре	28
<b>В.В.Вытришко, О.Л.Резинкин, Е.В.Христинч</b> Исследование свойств сегнетокерамик $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ допированных Zr, Pb и Sn в сильных электрических полях	33
<b>О.Ю.Глебов</b> Определение уровней электромагнитных помех в кабелях трансформаторов напряжения при коротком замыкании на шинах подстанции с целью обеспечения электромагнитной совместимости	43
<b>М.А.Дженюк</b> Разработка методики сегментирования потоков видеоинформации для автоматизации процесса обработки видеофайлов	56
<b>І.С.Дорохін, О.С.Андрєєв</b> Моделювання балансування навантаження у мережах MPLS	60
<b>І.С.Дорохін, Р.С.Костенко, Р.С.Шило</b> Моделювання диференціальних послуг у середовищі Ornet Modeler	68
<b>В.Г.Жекул, В.А.Кучернюк, Ю.И.Мельхер, С.Г.Поклонов, А.П.Смирнов, И.С.Швец</b> Электроразрядная обработка скважин на нефтедобывающих месторождениях Украины	72
<b>В.М.Золотарев, В.П.Карпушенко, В.В.Золотарев, Ю.А.Антонец, А.А.Науменко</b> Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от конструкции многослойной сшитой изоляции кабелей и проводов	78
<b>И.Е.Калугина, А.Г.Темников, С.В.Гундарева</b> Влияние формы вершины объекта и молниеотвода на вероятность поражения наземных объектов молнией	89
<b>В.В.Князев, И.П.Лесной, В.Н.Дныщенко</b> Исследование параметров SPD при импульсных перенапряжениях	100
<b>В.В.Князев, П.Н. Мельников, А.Ю. Чернухин</b> Характеристики стримерной короны при постоянном напряжении на молниеприемниках с различными формами вершин и поперечных сечений	111

<b>В.В.Князев, Ю.С.Немченко, И.П.Лесной, С.Б.Сомхиев, С.Ю.Скобликов</b> Генератор для испытаний бортового авиационного оборудования на невосприимчивость к нестандартным провалам напряжения электропитания постоянного тока ГНПН-А . . . . .	118
<b>В.В.Князев, А.Ю.Скобликов</b> Методика проверки адекватности математических моделей защитных свойств корпусов – электромагнитных экранов .	125
<b>Д.Г.Колиушко, Г.М.Колиушко, А.А.Петков</b> Определение напряжения прикосновения на оборудовании подстанций с учетом статистического характера расчетов сопротивления грунта . . . . .	138
<b>Г.М.Колиушко, П.Н.Мельников, О.С.Недзельский, А.А.Петков, С.С.Руденко, А.Ю.Чернухин</b> Экспериментальное исследование поражения плоскости длинной искрой . . . . .	146
<b>В.И.Кравченко, Ф.В.Лосев, И.В.Яковенко</b> Возбуждение электромагнитных колебаний в 2–D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением . . . . .	154
<b>В.И.Кравченко, Ф.В.Лосев, И.В.Яковенко</b> Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия . . . . .	161
<b>В.М. Куприенко</b> Нормирование параметров зоны защиты стержневых молниеотводов . . . . .	169
<b>В.М.Куприенко, Г.А.Акомелков, Н.М.Орехов, В.Н.Романцов</b> О применении отделителей совместно с ОПН для защиты от перенапряжений электрических сетей классов напряжения 6, 10кВ . . . . .	176
<b>В.М. Куприенко, Г.А. Акомелков, Н.М. Орехов, В.Н. Романцов</b> Результаты испытаний устройств защиты от атмосферных перенапряжений (УЗАП) для электрических сетей классов напряжения 6, 10кВ при имитации разряда молнии в провод . . . . .	188
<b>М.Ю.Охрименко</b> Підвищення показників якості інформаційного забезпечення користувачів систем спостереження повітряного простору . . . . .	200
<b>А.А.Петков</b> Программируемый разряд емкостных накопителей энергии на нелинейную нагрузку . . . . .	205
<b>В.М.Поштаренко, Д.С.Богомаз, М.А.Иванов, К.Д.Керемжанов</b> Оцінка ефективності використання спектру при впровадженні технології IEEE 802.22 . . . . .	212
<b>В.М.Поштаренко, Д.С.Богомаз, К.Д.Керемжанов, М.О.Иванов</b> Схема маршрутизації QoS в мережах на основі самоорганізації . . . . .	219
<b>В.М.Поштаренко, А.Мерсні</b> Оптимізація мереж IP/MPLS на основі імітаційного моделювання . . . . .	223
<b>В.М.Поштаренко, Д.В.Прутський, В.С.Грідін</b> Підвищення якості обслуговування безпроводних Mesh-мереж . . . . .	229
<b>В.В.Рудаков, В.П.Касаткин</b> Удельная энергия высоковольтных импульсных конденсаторов с лавсановым диэлектриком . . . . .	233
<b>A.G.Yushchenko, D.B.Mamedov</b> Intellectual CAD of MM waves WDR filters with increased stop band attenuation . . . . .	238

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК**  
**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО**  
**УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

Тематичний випуск  
«Техніка та електрофізика високих напруг»

Випуск № 21'2012

Науковий редактор д-р техн. наук, проф. В. І. Кравченко

Технічний редактор канд. фіз.-мат. наук Л. В. Ваврів

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І. Б. Обухова

Обл.вид. № 56-12

Підп. до друку 15.05.2012 р. Формат 60x84 1/16. Надруковано на цифровому видавничому комплексі Rank Xerox DocuTech 135. Умов.друк.арк. 9,4. Облік. вид. арк. 10,0. Наклад 300 прим. 1-й завод 1-100. Зам. № 22/12. Ціна договірна

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---

Друкарня ВАТ «Цифра Прінт».

Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 03.08.2009 р.  
Адреса: 61166, м. Харків, вул. Культури, 22-Б.

---