ISSN 2079-0740



ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

49'2011

Харків

ВІСНИК національного технічного університету «ХПІ»

Збірник наукових праць Тематичний випуск

«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.; Є.І.Сокол, д-р техн. наук, проф.; Є.Є.Александров, д-р техн.наук, проф.; Л.М.Бєсов, д-р техн. наук, проф.; Ф.Ф.Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М.Д.Годлевський, д-р техн.наук, проф.; А.І.Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В.Г.Данько, д-р техн. наук, проф.; В.Д.Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І.Ф.Домнін, д-р техн. наук, проф.; В.В.Єпифанов, канд. техн. наук, проф.; И.І.Зайцев, канд. техн. наук, проф.; В.Б.Клепіков, д-р техн. наук, проф.;

С.І.Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В.М.Кошельник, д-р техн. наук, проф.; В.І.Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г.В.Лісачук, д-р техн. наук, проф.; В.С.Лупіков, д-р техн. наук, проф.; О.К.Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В.І.Николаєнко, канд. іст. наук, проф.; В.А.Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; В.А.Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; В.Б.Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г.М.Сучков, д-р техн. наук, проф.; Ю.В.Тимофієв, д-р техн. наук, проф.; М.А.Ткачук, д-р техн. наук, проф.;

49'2011

Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – № 49. – 197 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.;
I.В.Яковенко,	д-р фізмат. наук, ст. наук. співр.

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

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ». Протокол № 10 від 1 листопада 2011 р.

ISSN 2079-0740 © Національний технічний університет «ХПІ» *М.И.БАРАНОВ*, д-р 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*, аспирант НТУ «ХПИ»

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ПЕРЕДВИЖНОГО ЕМКОСТНОГО ДЕЛИТЕЛЯ ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АМПЛИТУДОЙ ДО 100 КВ

Надані результати досліджень щодо розробки та створення на основі високовольтних керамічних конденсаторів типу К 15-10 діючого зразка пересувного ємкісного подільника імпульсної напруги амплітудою до ±100 кВ, що легко вбудовується у вимірювальні кола високовольтних випробувальних електроустановок.

The results of researches of the development and creation on the base of high-voltage ceramic capacitors type K 15-10 operating standard of movable capacitance divider of impulsive tension amplitude to ± 100 κ V, which can be easily inserted in the measuring chains of high-voltage proof-of-concept electric options are given.

Представлены результаты исследований по разработке и созданию на основе высоковольтных керамических конденсаторов типа К 15-10 действующего образца передвижного емкостного делителя импульсного напряжения амплитудой до ±100 кВ, что легко встраивается в измерительные цепи высоковольтных испытательных электроустановок.

Введение. При проведении высоковольтных исследований и эксплуатации действующего электрооборудования в области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) инженерно-техническим работникам необходимы переносные или передвижные измерительные средства, способные регистрировать с помощью цифровых осциллографов как большие импульсные токи (от единиц до сотен килоампер), так и высокие импульсные напряжения (от единиц до тысяч киловольт) нано-, микро- и миллисекундного временных диапазонов. В связи с отсутствием в настоящее время на инструментально-электротехнологическом рынке соответствующей измерительной аппаратуры с доступной для госучреждений ценой, предназначенной для работы в области ВИТ, научным работникам при их ограниченных финансовых возможностях приходится самостоятельно разрабатывать и создавать требуемые нестандартные измерительные средства. В НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» с его обширной высоковольтной элементной базой и разнообразной используемой техникой высокого электрического потенциала на протяжении ряда последних десятилетий подобная практика приняла для персонала обычную и само собой разумеющуюся форму научно-технической деятельности. Для отдела электромагнитных исследований нашего института при изучении поведения древесины в условиях воздействия на нее больших импульсных токов и высоких напряжений оказался необходимым малогабаритный емкостный делитель импульсного напряжения амплитудой до ±100 кВ (ЕДН-100), функционирующий в микросекундном временном диапазоне. Некоторым особенностям в оперативном создании подобного высоковольтного делителя напряжения и посвящена данная статья.

1 Выбор электрической схемы для емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100

Разработчиками емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 была выбрана классическая схема его построения (рис. 1), в которой высоковольтное плечо суммарной емкостью C_B на входное (измеряемое) напряжение U_B гальванически соединено с низковольтным плечом емкостью $C_H >> C_B$ [1,2]. Для улучшения передаточных характеристик разрабатываемого делителя его низковольтное плечо может содержать корректирующую R_kC_k – и согласующую R_cC_c –цепочки. Согласование данного делителя на низковольтной стороне с напряжением U_H с коаксиальным кабелем линии передачи требует включения в цепь его жилы согласующего сопротивления R_c , номинал которого должен быть равен волновому сопротивления R_c согласно рис. 1 вызывает уменьшение вдвое полезного электрического сигнала уровнем U_H , подаваемого на региструющий прибор (осциллограф того или иного типа).



Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема построения высоковольтного и низковольтного плеч передвижного емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН–100, работающего в микросекундном временном диапазоне

В соответствии со схемой рис. 1 нами были использованы следующие численные значения указанных выше электрических параметров элементов ЕДН-100: $C_B = 0,47$ нФ; $C_H = C_C = 0,54$ мкФ; $R_C = Z_K = 75$ Ом; $R_k = 27$ Ом; $C_k = 2,8$ нФ.

2 Выбор элементов и конструкции емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100

Исхоля, прежде всего, из имеюшейся в нашем распоряжении высоковольтной элементной базы при создании емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕЛН-100 были применены высоковольтные керамические конденсаторы типа К 15-10 емкостью 4700 пФ на номинальное напряжение 50 кВ, предварительно прошедшие соответствующие высоковольтные испытания постоянным напряжением 40 кВ и на основании их результатов возможную отбраковку (из 20 шт. конденсаторов испытания в среде трансформаторного масла указанным напряжением, действующим на них в течение 1 минуты, не прошли всего 2 шт.). Для обеспечения запаса электрической прочности высоковольтного плеча делителя ЕДН-100 нами при его номинальном напряжении $U_{B} = \pm 100$ кВ было использовано десять последовательно соединенных на воздухе конденсаторов типа К 15-10, обеспечивающих численное значение емкости С_в, равное 470 пФ. Жесткая гальваническая связь указанных керамических конденсаторов (наружным диаметром 131 мм и полной высотой 37 мм) с высоковольтными посеребренными дисковыми электродами была осуществлена при помощи коротких стальных шпилек М8 длиной 50 мм. Для обеспечения механической прочности конденсаторной сборки высоковольтного плеча делителя по ее высоте между соседними конденсаторами были установлены короткие упорные изоляционные трубки из СТЭФ наружным диаметром 60 мм при толщине их стенки 5 мм и длине 70 мм. Для повышения жесткости высоковольтного плеча делителя по высоте его конденсаторной сборки общей длиной 749 мм были размещены четыре упорных диска из СТЭФ диаметром 146 мм и толщиной 5 мм. После монтажа на горизонтальном столе указанной конденсаторной сборки она в таком же положении поэтапно размещалась внутрь изоляционной трубы корпуса из СТЭФ длиной 915 мм и внутренним диаметром 151 мм при толщине ее стенки в 12 мм. После выполнения такой технологической операции трубчатый цилиндрический корпус высоковольтного плеча делителя переводился в вертикальное положение и закреплялся на его изоляционном квадратном основании из СТЭФ с размером в плане 395х395 мм² при толщине в 20 мм. Центровка внутренней части высоковольтного плеча делителя относительно его изоляционной трубы-корпуса проводилась при помощи упорных изоляционных дисков, размещенных между керамическими конденсаторами, и наружного круглого стального фланца с осевым отверстием и закругленным высоковольтным электродом. Низковольтное плечо рассматриваемого делителя емкостью $C_H = C_C = 0.54$ мкФ было реализовано на основе двух параллельно соединенных конденсаторов типа К 73-11 емкостью 0.27 мкФ на постоянное напряжение до 250 В. В данном плече активное сопротивление R_k было выполнено на основе резистора МЛТ-2 номиналом 27 Ом, а емкость C_k – на основе конденсатора КСО-1 номиналом 2800 пФ. Согласующее активное сопротивление R_C в измерительной цепи кабельной линии передачи полезного электрического сигнала с низковольтного плеча делителя ЕДН-100 было собрано на базе двух параллельно включенных резисторов МЛТ-2 номиналом 150 Ом. Электрическая часть низковольтного плеча описываемого делителя размещалась в прямоугольном алюминиевом корпусе с коаксиальным разъемом СР-75, жестко закрепленном на изоляционном основании делителя и подсоединенном к заземляющей шине высоковольтной испытательной установки. Для удобства в работе к основанию из СТЭФ-20 делителя по его углам были симметрично закреплены четыре вращающихся колеса высотой 70 мм. В результате общая высота разработанного делителя ЕДН-100 составила 1085 мм.



Рисунок 2 – Осциллограмма нарастающей части импульса напряжения на низковольтном плече делителя ЕДН-100 при подаче на вход его высоковольтного плеча прямоугольного импульса напряжения амплитудой 40 В с длительностью фронта до 30 нс (практически переходная характеристика емкостного делителя напряжения ЕДН-100)

3 Результаты оценки переходной характеристики емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 при помощи низковольтного источника импульсного напряжения

Для проверки работоспособности в микросекундном временном диапазоне разработанного и созданного в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в «металле» емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 нами при помощи стандартного низковольтного генератора Г5-54, формирующего на электрической нагрузке прямоугольный импульс напряжения с фронтом до 30 нс при амплитуде не более 60 В, была в первом приближении снята его переходная характеристика (рис. 2). Из данных рис. 2 видно, что при подаче на вход высоковольтного плеча делителя типа ЕДН-100 указанного наносекундного сигнала длительность фронта регистрируемого при помощи цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012 с его низковольтного плеча полезного сигнала между уровнями 0,3-0,9 составляет около $\tau_f = 112$ нс.

Данную величину τ_f можно приближенно принять за длительность переходной характеристики емкостного делителя импульсного напряжения ЕДН-100. Это дает нам определенное основание считать, что созданный делитель напряжения типа ЕДН-100 можно использовать в качестве рабочего средства для измерения импульсов напряжения микросекундной длительности.

4 Исследование метрологических характеристик емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 при помощи высоковольтного источника импульсного напряжения

На рис. 3 показан внешний вид недавно созданного в отделе № 6 нашего института емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100.



Рисунок 3 – Внешний вид созданного в 2011 году емкостного делителя импульсного напряжения ЕДН-100, подключенного к стандартным измерительным шарам Ø 125 мм и высоковольтному источнику импульсного напряжения амплитудой до ±100 кВ

Разработанный делитель ЕДН-100 успешно прошел необходимые испытания при условиях работы в реальной схеме высоковольтной испытательной установки (рис. 4). Для этой цели нами был использован генератор импульсных токов на номинальное напряжение ± 100 кВ (ГИТ-100) [3], формирующий в схеме согласно рис. 1 после срабатывания управляемого многозазорного воздушного коммутатора F_1 и пробоя воздушного промежутка стандартного двухэлектродного шарового разрядника ШР с диаметром электродов 125 мм на делителе ЕДН-100 высоковольтный апериодический импульс напряжения.



Рисунок 4 – Принципиальная электрическая схема высоковольтного источника импульсного напряжения амплитудой до ±100 кВ, использованного для исследования метрологических характеристик разработанного емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 (*F*₁ – многозазорный воздушный коммутатор типа M3K-100; ШР – стандартный двухэлектродный шаровой разрядник с электродами Ø 125 мм; ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов на напряжение ±100 кВ; ЦО – цифровой осциллограф; *R*₁, *R*₂ – нагрузочные активные сопротивления для формирования на делителе ЕДН-100 апериодического импульса высокого напряжения)

Отметим, что высоковольтный генератор ГВПИ на своем выходе для защиты от влияния на его работоспособность высоковольтной цепи ГИТ-100 содержал необходимую разделительную емкость номиналом 180 пФ на напряжение до ± 120 кВ [4]. При высоковольтных испытаниях делителя ЕДН-100 была использована лишь половина емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) ГИТ-100 (всего 10 шт. параллельно соединенных импульсных конденсаторов типа ИК 100-0,4У4 общей емкостью $C_{\Gamma} = 4$ мкФ [3]). В ШР длина воздушного промежутка между медными никелированными шарами Ø 125 мм выбиралась равной 10 мм, что согласно требованиям ГОСТ 17512-82 [5] соответствует амплитуде пробивного импульсного напряжения положительной полярности указанной выше временной формы, равной $U_{IIIP} = 31,7$ кВ. На рис. 5 приведена осциллограмма фронтальной части апериодического импульса напряжения, формируемого на исследуемом делителе ЕДН-100 при разряде ЕНЭ генератора ГИТ-100 (при собствен-

ных электрических параметрах высоковольтного источника импульсного напряжения, равных $R_{\Gamma} = 0,4$ Ом и $L_{\Gamma} = 2,4$ мкГн [3]) на разрядную цепь согласно рис. 4, в которой на базе высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60 были использованы следующие значения нагрузочных активных сопротивлений: $R_1 = 75$ Ом и $R_2 = 250$ Ом. Заметим, что активное сопротивление R_1 совместно с емкостью делителя ЕДН-100 будет определять длительность фронта между уровнями 0,3-0,9 фиксируемого импульса напряжения, а активное сопротивление R_2 с емкостью «в разряде» генератора ГИТ-100 – длительность данного импульса на его полуспаде (уровне 0,5).



Рисунок 5 – Осциллограмма нарастающей части апериодического импульса напряжения, полученная при помощи емкостного делителя импульсного напряжения ЕДН-100 в высоковольтной испытательной электрической схеме согласно рис. 4 (*U*_{IIP} = 31,7 кВ)

Из данных рис. 5 следует, что в рассматриваемом случае длительность фронта регистрируемого при помощи делителя ЕДН-100 и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012 апериодического импульса напряжения составляет между уровнями 0,3-0,9 около 290 нс (масштаб по вертикали – 5 В/клетка; масштаб по горизонтали – 250 нс/клетка). При этом на наносекундном фронте импульса высокого напряжения наблюдаются наложенные затухающие колебания амплитудой до 10 %, что свидетельствует о невозможности применения подобного делителя для измерения импульсного напряжения наносекундного временного диапазона. На рис. 6 представлена осциллограмма полного апериодического импульса напряжения, зарегистрированная в схеме согласно рис. 4 с помощью указанного цифрового осциллографа и емкостного делителя импульсного напряжения типа ЕДН-100 (масштаб по вертикали – 5 В/клетка; масштаб по горизонтали – 100 мкс/клетка). Видно, что амплитуда измеряемого импульса напряжения при его длительности на уровне 0,5 в 420 мкс равна $U_H = 12,6$ В. Поэтому опытный масштабный коэффициент k_{D2} делителя ЕДН-100 будет составлять около 31,7·10³ В/12,6 В = 2515. Расчетное значение данного коэффициента равно $k_{D1} = 2C_H/C_B = 2298$.



Рисунок 6 – Осциллограмма полного апериодического импульса напряжения, полученная при помощи емкостного делителя импульсного напряжения ЕДН-100 в высоковольтной испытательной электрической схеме согласно рис. 4 (*U*_{LUP} = 31,7 кВ)

Из данных рис. 6 явствует, что кривая микросекундного импульса напряжения, полученная с помощью ЕДН-100, искажениям не подвергается.

Выводы. Разработан, изготовлен и испытан в работе емкостный делитель импульсного напряжения типа ЕДН-100, предназначенный для измерения микросекундных импульсов высокого напряжения амплитудой до ±100 кВ.

Список литературы: 1. Шваб А. Измерения на высоком напряжении / Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с. 2. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с. 3. Баранов М.И., Бочаров В.А., Забко Ю.П. и др. Комплекс электрофизического оборудования для генерирования микро- и миллисекундных импульсов напряжения до 1,2 МВ и тока до 200 кА // Технічна електродинаміка. – 2003. – № 5. – С. 55-59. 4. Баранов М.И., Бочаров В.А., Забко Ю.П. Комплекс высоковольтного электрофизического оборудования для испытания средств молнизащиты технических объектов грозовыми и коммутационными импульсами напряжения микро- и миллисекундной длительности амплитудой до 1 МВ // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 4. – С. 60-65. 5. 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 17.10.2011

М.И.БАРАНОВ, докт. техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»; *Г.М.КОЛИУШКО*, канд. техн. наук, зам. директора ин-та, НТУ «ХПИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДЛИННЫХ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ В ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЕ «СТЕРЖЕНЬ–СТЕРЖЕНЬ» ДЛЯ МИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Надані результати експериментальних досліджень щодо електричного пробою повітряних проміжків завдовжки до 3 метрів в електродній системі «стрижень–стрижень» за дії на неї мегавольтних імпульсів напруги мікросекундного часового діапазону.

Results of experimental studies on the electric discharge of air intervals of up to 3 meters long in the electrode system «bar-bar» subjected to megavoltage impulses of the microsecond temporal range are given.

Предоставлены результаты экспериментальных исследований по электрическому пробою воздушных промежутков длиной до 3 метров в электродной системе «стержень-стержень» при действии на нее мегавольтных импульсов напряжения микросекундного временного диапазона.

Введение

В области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) при создании генераторов импульсных напряжений (токов) высокого и сверхвысокого электрических потенциалов и проведении испытаний различных технических объектов на электромагнитную совместимость и стойкость требуются данные. касающиеся электрической прочности длинномерной твердой, жидкой и газовой изоляции [1,2]. При этом указанные электрофизические данные должны быть привязаны к соответствующим временным параметрам воздействующих на изоляцию импульсов напряжения и тока. В настоящее время традиционными для ВИТ временными диапазонами изменения испытательных импульсов напряжения (тока) являются нано-, микро- и миллисекундные диапазоны. В НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» на его экспериментально-исследовательском полигоне активно используется высоковольтное оборудование наружной установки, работающее в режиме воздействия на его изоляцию микросекундных импульсов сверхвысокого напряжения [3]. Поэтому как для данного высоковольтного испытательного электрооборудования, так и других существующих и вновь разрабатываемых устройств ВИТ на сегодня не потеряли своей актуальности результаты экспериментальных исследований электрической прочности длинных воздушных промежутков (длиной до 10 м) в условиях приложения к ним микросекундных импульсов напряжения мегавольтного уровня.

1. Выбор электроустановки для проведения экспериментальных исследований электрической прочности длинных воздушных промежутков

Для выполнения работ по определению опытным путем электрической прочности длинномерной воздушной изоляции нами был выбран генератор импульсных напряжений и токов типа ГИНТ-4/1 (рис. 1) на номинальное выходное напряжение 4 МВ и запасаемую электрическую энергию до 1 МДж [4,5]. Данный генератор этажерочного типа, содержащий 16 каскадов с двухэлектродными воздушными шаровыми разрядниками Ø 125 мм, при двухполярном зарядном напряжении U_3 своих 128 конденсаторов типа КБМГ-125/1 (напряжение – 125 кВ; емкость – 1 мкФ) характеризуется следующими собственными электрическими параметрами [4,5]: емкостью «в разряде» $C_{\Gamma} = 0,125$ мкФ; индуктивностью $L_{\Gamma} = 80$ мкГн; активным сопротивлением $R_{\Gamma} = 4,5$ Ом.



Рисунок 1 – Внешний вид мегавольтного генератора ГИНТ-4/1, размещенного на испытательном полигоне института, и двухэлектродной системы «стержень–стержень» при испытаниях электрической прочности длинных воздушных промежутков

При использовании для рассматриваемых высоковольтных испытаний генератора ГИНТ-4/1 принципиальная электрическая схема испытательной электроустановки примет вид, приведенный на рис. 2. В данной схеме для измерения на исследуемых воздушных промежутках импульсного напряжения был применен омический делитель напряжения типа ОДН-2 общей высотой 12,6 м, содержащий в составе высоковольтного плеча девять последовательно соединенных секций, каждая из которых была изготовлена на основе двух параллельных *R*-цепочек с применением 20 шт. керамических резисторов типа ТВО-10-2,4 кОм. При 180 шт. использованных резисторов указанного номинала общее активное сопротивление высоковольтного плеча данного делителя составило 107.3 кОм. Низковольтное плечо делителя ОДН-2 было выполнено из резисторов типа ТВО-2-2 Ом с общим активным сопротивлением 4 Ом. С учетом выбранных сопротивлений в высоковольтном и низковольтном плечах делителя ОДН-2 масштабный коэффициент нашего средства измерения (при коэффициенте деления ОДН-2, равном $K_{II} = 107300/4 = 26825$) составил величину, численно равную К_М=2К_Л=53650. При регистрации амплитудновременных параметров (АВП) импульсного тока в разрядной цепи генератора ГИНТ-4/1 в качестве рабочего измерительного средства нами был использован коаксиальный шунт типа ШК-300, прошедший метрологическую проверку и имеющий коэффициент преобразования, численно равный К_Ш = 11261 A/B [6].



Рисунок 2 – Принципиальная схема испытаний электрической прочности длинных воздушных промежутков в разрядной цепи генератора ГИНТ-4/1 (*F*₁ – отсекающий воздушный разрядник генератора; РВП – рабочий воздушный промежуток двухэлектродной системы «стержень–стержень»; ОДН-2 – омический делитель напряжения на 2 МВ; ШК-300 – измерительный коаксиальный шунт на 300 кА; ЦО – цифровой осциллограф)

Отметим, что при регистрации АВП микросекундных импульсов напряжения амплитудой до 2 МВ и тока амплитудой до 100 кА в разрядной цепп генератора ГИНТ-4/1 с испытываемыми воздушными промежутками длиной l_{Π} до 3 м были применены два поверенных запоминающих цифровых осциллографа типа Tektronix TDS 1012, размещенных в заглубленном экранированном измерительном бункере и соединенных с делителем ОДН-2 и шунтом ШК-300 экранированными кабельными линиями передачи сигнала длиной около 60 м.

2 Выбор и описание конструкции двухэлектродной системы с длинным воздушным промежутком

В проводимых экспериментах на высоковольтной испытательной электроустановке ГИНТ-4/1 авторы остановились на двухэлектродной системе «стержень–стержень», нашедшей широкое применение в области ВИТ. Электроды исследуемого воздушного промежутка длиной l_{II} представляли собой круглые стальные цилиндры Ø 20 мм при длине верхнего электрода 1 м (рис. 3) и нижнего (рис. 4) – 0,4 м. Верхний электрод рассматриваемой воздушной двухэлектродной системы «стержень–стержень» фиксировался на высоте при помощи растянутого между изоляционными опорами электроустановки капронового каната Ø 15 мм (см. рис. 3), а ее нижний электрод закреплялся на чугунном фланце опорного фарфорового изолятора типа КО-400С (см. рис. 4).



Рисунок 3 – Внешний вид верхнего стержневого стального электрода Ø 20 мм и подсоединенного к нему гибкого стального токопровода делителя напряжения типа ОДН-2 при испытаниях электрической прочности длинных воздушных промежутков

Рабочие края указанных электродов системы «стержень-стержень», обращенные внутрь испытываемых воздушных промежутков, имели радиус закругления своих кромок, примерно равный 5 мм. Верхний электрод гибкими стальными токопроводами согласно схеме на рис. 2 подсоединялся к металлической крыше генератора ГИНТ-4/1 и делителю напряжения ОДН-2, а нижний электрод – соответственно к измерительному шунту ШК-300 и заземленной гибкой стальной шине. Выбранная конструкция двухэлектродной системы «стержень–стержень» позволяла с применением передвижной вышки сравнительно легко изменять длину l_{Π} ее воздушного промежутка, фиксируемую при помощи длинной деревянной измериткльной линейки с погрешностью до 10 %. В момент проведения рассматриваемых электрических испытаний в безветренную осеннюю погоду температура окружающего воздуха составляла 14 °C, а его относительная влажность приближалась к отметке 90 %.



Рисунок 4 — Внешний вид нижнего стержневого стального электрода Ø 20 мм и подсоединенных к нему измерительного шунта ШК-300 и заземленной гибкой стальной шины при испытаниях электрической прочности длинных воздушных промежутков

3 Результаты экспериментов по определению для микросекундных импульсов напряжения электрической прочности длинных воздушных промежутков в системе «стержень–стержень»

Испытания электрической прочности воздушной изоляции применительно к нашему случаю проводились в соответствии с требованиями действующих и поныне межгосударственного стандарта ГОСТ 1516.2-97 [7] и стандарта ГОСТ 17512-82 [8]. Измерение импульсного напряжения на рабочем воздушном промежутке (РВП) двухэлектродной системы «стержень-стержень» выполнялось с загрубленным применением согласно требований по [8] метода 50 %-ного разрядного напряжения. При этом при неизменном значении длины l_{II} РВП (для 1, 2 и 3 м) для генератора ГИНТ-4/1 осуществлялось изменение его зарядного напряжения U_3 в диапазоне ±(30-60) кВ, что обеспечивало изменение выходного напряжения U_B на указанном генераторе от +960 до +1920 кВ. В этом случае при ступечатом изменении величины выходного напряжения U_B генератора за 50 %-ное разрядное напряжение принималась та его величина, при которой в РВП возникало не менее четырех искровых разрядов из 10 приложенных от генератора ГИНТ-4/1 к воздушному промежутку микросекундных импульсов напряжения. Для указанных выше длин l_{Π} РВП измерение напряжения (тока) на воздушных промежутках начиналось с приложения к ним от генератора ГИНТ-4/1 поряд-ка пяти импульсов (по требованиям же ГОСТ 17512-82 не менее 10 импульсов), не вызывающих в РВП искровых разрядов.

На рис. 5 приведена типичная осциллограмма микросекундного импульса напряжения на РВП длиной $l_{\Pi} = 2$ м при электрическом пробое воздушного промежутка в разрядной цепи генератора ГИНТ-4/1. Из данных рис. 5 видно, что искровой разряд в данном РВП происходит на нарастающей части импульсного напряжения, приложенного к воздушному промежутку. При этом на РВП ($l_{\Pi} = 2$ м) напряжение среза составляет около $U_C = 22\text{Bx}53650 = 1180,3$ кВ при предразрядном времени примерно $T_C = 1,7$ мкс и длительности среза около $T_{DC} = 5,37$ мкс. Данные этой осциллограммы и других результатов испытаний для рассматриваемого РВП свидетельствуют о том, что в этом случае ($l_{\Pi} = 2$ м) 50 %-ное разрядное напряжение приближенно составляет не менее 1180 кВ, что при временах нарастания импульсного напряжения на воздушном промежутке системы «стержень–стержень» длиной 2 м в единицы микросекунд соответствует пробивному градиенту электрического поля около 590 кВ/м.



Рисунок 5 – Осциллограмма импульса напряжения на воздушном промежутке длиной 2 м, срезанного на его нарастающей части ($U_3 = \pm 60 \text{ kB}$; $U_B = 1920 \text{ kB}$; напряжение среза $U_C = 1180,3 \text{ kB}$; предразрядное время $T_C = 1,7 \text{ мкс}$; длительность среза $T_{DC} = 5,37 \text{ мкс}$; масштаб по вертикали – 5 В/клетка; масштаб по горизонтали – 2,5 мкс/клетка)

На рис. 6 для случая, соответствующего данным рис. 5, показана типичная осциллограмма импульсного тока при колебательном разряде конденсаторов генератора ГИНТ-4/1 на пробитый разрядный воздушный промежуток длиной $l_{II} = 2$ м в исследуемой системе «стержень–стержень». Из данных рис. 6 следует, что наибольшая амплитуда импульса разрядного тока на РВП составляет $I_{m1} = 6,72$ Вх11261 А/В = 75,7 кА. Этой токовой амплитуде соответствует время, равное $t_{m1} = 4,7$ мкс. Видно, что из-за искровых процессов в контактных подсоединениях измерительного шунта ШК-300 к нижнему электроду системы «стержень–стержень» на третьей и последующих полуволнах импульсного тока в разрядной цепи мегавольтного генератора ГИНТ-4/1 с пробитым РВП наблюдаются наложенные колебания, искажающие плавный ход кривой тока.



Рисунок 6 – Осциллограмма импульса тока в разрядной цепи генератора ГИНТ-4/1 при электрическом пробое воздушного промежутка длиной 2 м ($U_3 = \pm 60 \text{ kB}$; $U_B = 1920 \text{ kB}$; $I_{m1} = 75,7 \text{ kA}$; $t_{m1} = 4,7 \text{ мкс}$; период колебаний большого импульсного тока разряда $T_{\Gamma} = 21 \text{ мкс}$; масштаб по вертикали – 2 В/клетка; масштаб по горизонтали – 10 мкс/клетка)

На рис. 7 представлена типичная осциллограмма импульса напряжения микросекундной длительности на исследуемом РВП длиной $l_{\Pi} = 3$ м в случае электрического пробоя в системе «стержень–стержень» ее воздушного промежутка. Данная осциллограмма по сравнению с аналогичной осциллограммой, приведенной на рис. 5 для импульсного напряжения на РВП длиной $l_{\Pi} = 2$ м, отличается не только бо́льшей величиной напряжения среза ($U_C = 1341,3$ кВ), но и существенно возросшим для этого случая предразрядным временем $T_C = 12,5$ мкс >> 1,7 мкс. При этом длительность среза $T_{DC} = 5,47$ мкс близка к аналогичной временной характеристике для РВП дли-

ной $l_{II} = 2$ м, численно составляющей согласно данным рис. 5 значение около $T_{DC} = 5,37$ мкс. Выполненная оценка 50 %-ного разрядного напряжения для воздушного промежутка длиной 3 м в принятой системе «стержень–стержень», испытывающего воздействие от мегавольтного генератора ГИНТ-4/1 микросекундного импульса напряжения, показывает, что оно приближенно составляет не менее 1340 кВ. Поэтому пробивная усредненная напряженность электрического поля в рассматриваемой конструкции двухэлектродной системы «стержень–стержень» с воздушным промежутком длиной 3 м характеризуется уровнем, равным около 447 кВ/м.



Рисунок 7 – Осциллограмма импульса напряжения на воздушном промежутке длиной 3 м, срезанного на его нарастающей части ($U_3 = \pm 60 \text{ kB}$; $U_B = 1920 \text{ kB}$; напряжение среза $U_C = 1341,3 \text{ kB}$; предразрядное время $T_C = 12,5 \text{ мкс}$; длительность среза $T_{DC} = 5,47 \text{ мкс}$; масштаб по вертикали – 5 В/клетка; масштаб по горизонтали – 2,5 мкс/клетка)

На рис. 8 приведена осциллограмма затухающего разрядного тока в цепи генератора ГИНТ-4/1 для случая электрического пробоя в выбранной системе «стержень–стержень» РВП длиной $l_{\Pi} = 3$ м. Из нее видно, что увеличение длины воздушного промежутка с 2 до 3 м приводит к заметному уменьшению (затуханию) первой амплитуды колебательного импульса тока, примерно составляющей $I_{m1} = 62,2$ кА при $t_{m1} = 4,1$ мкс. Следует отметить то, что при этом длительность периода колебаний импульсного тока в разрядной цепи испытательной электроустановки практически сохраняет свои прежние значения, равные около $T_{\Gamma} = 21$ мкс. Связано это с внесением при пробое РВП сильноточным плазменным каналом воздушного искрового разряда дополнительного го активного сопротивления в разрядную цепь генератора ГИНТ-4/1 [9]. Данная токовая осциллограмма от аналогичной осциллограммы, показанной на

рис. 6, отличается практическим отсутсвием на кривой разрядного тока наложенных колебаний и соответственно видимых искажений. Заметим, что последние для токовой осциллограммы на рис. 8 были устранены чисто механическим путем благодаря лучшей затяжке болтовых соединений в сильноточной цепи подключения измерительного шунта ШК-300 к нижнему стальному электроду исследуемой двухэлектродной системы «стержень–стержень» с длинным воздушным промежутком (см. рис. 4). Отсюда вытекает простая практическая рекомендация для исследователей высоковольтных сильноточных разрядов: при регистрации АВП импульсов напряжения и тока в разрядных цепях испытательных электроустановок сверхвысокого напряжения и больших импульсных токов: переходные сопротивления в контактных соединениях разрядных цепей и измерительных средств должны быть минимизированы путем применения в них дополнительных проводящих уплотнений и жесткого закрепления.



Рисунок 8 – Осциллограмма импульса тока в разрядной цепи генератора ГИНТ-4/1 при электрическом пробое воздушного промежутка длиной 3 м ($U_3 = \pm 60 \text{ kB}$; $U_B = 1920 \text{ kB}$; $I_{m1} = 62,2 \text{ kA}$; $t_{m1} = 4,1 \text{ мкс}$; период колебаний большого импульсного тока разряда $T_{\Gamma} = 21 \text{ мкс}$; масштаб по вертикали – 2 В/клетка; масштаб по горизонтали – 10 мкс/клетка)

Представленные выше в разделе 3 данной работы некоторые экспериментальные результаты предварительных испытаний электрической прочности длинномерной воздушной изоляции (длиной до 3 м) позволяют для воздействующих импульсов сверхвысокого напряжения с временами нарастания в единицы (десятки) микросекунд при выборе длины воздушных промежутков в конструкциях генераторов импульсных напряжений (токов) и других устройств ВИТ ориентироваться на рабочий усредненный градиент электрического поля в них не более 500 кВ/м при $l_{II} \le 2$ м и не более 400 кВ/м при $l_{II} \le 3$ м.

Выводы

1. При помощи мегавольтного генератора ГИНТ-4/1 наружной установки, омического делителя напряжения типа ОДН-2, измерительного шунта типа ШК-300 и запоминающих цифровых осциллографов типа Tektronix TDS 1012 выполнены экспериментальные исследования электрической прочности длинных воздушных промежутков (длиной до 3 м) в двухэлектродной системе «стержень–стержень», испытывающих воздействие импульсного сверхвысокого напряжения микросекундного временного диапазона.

2. Для воздушных промежутков длиной до 2 м в выбранной конструкции двухэлектродной системы «стержень-стержень» и временах нарастания воздействующих на нее импульсов сверхвысокого напряжения в единицы и десятки микросекунд 50 %-ное разрядное напряжение приближенно составляет около 1180 кВ, а для воздушных промежутков длиной до 3 м – около 1340 кВ.

3. Пробивной усредненный градиент электрического поля для воздушных промежутков длиной до 2 м в исследуемой двухэлектродной системе «стержень–стержень» при указанных импульсах воздействующего на нее напряжения ориентировочно составляет примерно 590 кВ/м, а для воздушных промежутков длиной до 3 м – примерно 447 кВ/м.

4. При длинах воздушных промежутков в конструкциях ВИТ с указанными импульсами сверхвысокого напряжения до 2 м рабочий усредненный градиент электрического поля в них может составлять не более 500 кВ/м, а для воздушных промежутков длиной до 3 м – не более 400 кВ/м.

5. Подобные исследования целесообразно провести для более широкого временного диапазона изменения импульсного напряжения, иных конструкций двухэлектродной системы и бо́льших длин воздушных промежутков.

Список литературы: 1. Техника высоких напряжений / Под общей ред. Г.С. Кучинского. - СПб: Издво ПЭИПК, 1998. - 700 с. 2. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. - М.: Энергия, 1980.- 136 с. 3. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Комплекс высоковольтного испытательного электрофизического оборудования экспериментальной базы НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. - Харків: НТУ «ХПІ», 2004. – № 4. – С. 3-13. 4. Пекарь И.Р., Фертик С.М. Мощная высоковольтная электроразрядная установка на 4 МВ и 1 МДж // Сборник докл. межвуз. конф.: «Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция». - М.: Энергия, 1970. - С. 22-26. 5. Баранов М.И., Бочаров В.А., Игнатенко Н.Н. и др. Мощные генераторы импульсных напряжений и токов предельных параметров для тестирования силового электроэнергетического оборудования // Електротехніка і електромеханіка. - 2003. - № 2. - С. 75-80. 6. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. - 2008. - № 3. - С. 81-85. 7. 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. 8. 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. 9. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Лысенко В.О. Экспериментальное определение активного сопротивления и электропроводности сильноточного плазменного канала в разрядной цепи генератора импульсной компоненты тока искусственной молнии // Електротехніка і електромеханіка. - 2011. - № 3. - С. 51-55.

Поступила в редколлегию 27.10.2011

А.Д. БЛАЩЕНКО, научн. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев; *Н.П. ГОЛОВИНА*, аспирант, ИИПТ НАН Украины, Николаев;

К РАБОТЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ В РЕЖИМЕ, БЛИЗКОМ К СОГЛАСОВАННОМУ

Методом чисельного моделювання досліджено вплив роботи імпульсного електророзрядного джерела енергії у режимі, що близький до узгодженого, для розрядноімпульсних технологій, що використовують високовольтний пробій у воді. З використанням експериментальних даних за умов вищевказаного режиму роботи енергоджерела побудовано графічні залежності, що демонструють вплив геометрії електродної системи та електричної ємності накопичувача на передпробивні втрати енергії.

According to the method of numerical modeling the investigation of pulse electrodischarging energy source operation in mode, which is almost agreed, for discharge technologies based on high-voltage breakdown in water. With using of experimental data for considered energy source operation mode graphical dependences, which show the geometry of electrode system and electrical capacity influence on energy losses in pre-breakdown stage, are described.

Методом численного моделирования исследовано влияние работы импульсного электроразрядного источника энергии в режиме, близким к согласованному для розрядоимпульсных технологий, которые используют высоковольтный пробой в воде. С использованием экспериментальных данных при условиях вышеуказанного режима работы энергоисточника построены графические зависимости, демонстрирующие влияние геометрии электродной системы и электрической емкости накопителя на предпробивные потери энергии.

Эффективность любой разрядноимпульсной технологии (РИТ) определяется режимом работы емкостного импульсного электроразрядного источника энергии (ИЭРИЭ), обеспечивающим выделение максимально возможной запасенной энергии в течение первой полуволны разрядного тока, то есть режимом, близким к согласованному. Для реализации такого режима сопротивление нагрузки, то есть сопротивление плазменного канала разрядного промежутка, должно быть достаточно большим (в линейных цепях оно должно приближаться к волновому сопротивлению контура $\sqrt{L/C}$). В ИЭРИЭ этот режим может быть достигнут путем увеличения длины разрядного промежутка при неизменном зарядном напряжении. При этом в РИТ, использующих высоковольтный пробой, существенным образом возрастают предпробивные потери энергии Wn и уменьшается напряжение пробоя Unp. Свыше определенной величины разрядного промежутка пробой перестает реализовываться и вся запасенная в накопителе энергия сливается в водную среду технологического объема, то есть в электрическом разряде реализуется только предпробивной режим, который для РИТ не представляет практического интереса.

Цель работы: провести исследования, направленные на определение параметров ИЭРИЭ, обеспечивающих режим работы, близкий к согласованному, для РИТ, использующих высоковольтный пробой в воде.

В результате ранее проведенных исследований [1] было показано, что предпробивные потери энергии можно представить как:

$$Wn = \frac{2 \cdot \sqrt{\pi S_e \cdot \alpha \cdot l \cdot \sigma \cdot U_3^2 \cdot (1 + 40l)}}{(U_3 - U_0)^2} = f \frac{CU_3^2}{2}, \qquad (1)$$

где S_e – площадь оголенной поверхности электрода, м²; $\alpha = 0,36 \cdot 10^6$ – постоянная, $B^2 \cdot c/m$; $\sigma = 0,055$ – удельная электропроводность воды, $(Om \cdot m)^{-1}$; $U_O = 1,82 \cdot 10^6 \cdot r_e \cdot \ln(4 \cdot l/r_e)$ – минимальное пороговое напряжение перехода теплового пробоя в лидерный, В; U_3 – зарядное напряжение, В; r_e – радиус оголенной части электрода, м; l – длина межэлектродного промежутка, м; C – емкость накопителя энергии, Φ ; f – доля энергии от запасенной, затрачиваемой на формирование канала разряда (коэффициент предпробивных потерь энергии), откуда зарядное напряжение –

$$U_{3} = \sqrt{\frac{4\sqrt{\pi S_{e}} \cdot \alpha \cdot l \cdot \sigma \cdot (1+40l)}{f \cdot C}} + Uo .$$
⁽²⁾

При этом напряжение пробоя [3] -

$$Unp = \sqrt{1 - f} \cdot \left[\sqrt{\frac{4\sqrt{\pi S_e} \cdot \alpha \cdot l \cdot \sigma \cdot (1 + 40l)}{f \cdot C}} + Uo \right].$$
(3)

Как уже упоминалось, минимальное пороговое напряжение Uo, отражая геометрию электродной системы, а именно – радиус электродов r_e и величину межэлектродного промежутка l, является, по сути, минимально возможным напряжением пробоя. При этом коэффициент предпробивных потерь f будет максимально достижимым, а зарядное напряжение U3 – минимально допустимым, при которых еще возможен пробой такого межэлектродного промежутка. В этой связи вполне логично критерием работы ИЭРИЭ в режиме, близком к согласованному, принять равенство напряжения пробоя (3) минимальному пороговому напряжению перехода теплового пробоя в лидерный:

$$Unp = Uo . (4)$$

Учитывая то, что пороговое напряжение *Uo* может быть представлено в виде функции длины разрядного промежутка *l*, то из вышеприведенных выражений при заданной геометрии электродной системы (радиуса электрода r_e , площади оголенной его поверхности S_e) и электропроводности воды σ коэффициент предпробивных потерь *f* и соответствующее зарядное напряжение *Uз* могут быть также представлены в виде функции от *l*.

Для проведения расчета были использованы данные физического эксперимента [2] для разрядного контура с емкостью накопителя C = 3,22 мкФ, индуктивностью контура L = 2,15 мкГн при напряжении пробоя $U_3 = 39,8$ кВ.

При этом было принято: проводимость воды $\sigma = 0,055$ (Ом·м)⁻¹, радиус электрода $r_e = 4 \cdot 10^{-3}$ м, длина оголенной части электрода $l_e = 40 \cdot 10^{-3}$ м.

Из условия (4), при подстановке в него выражения (3), может быть определен максимально возможный коэффициент предпробивных потерь f как функция длины межэлектродного промежутка (рис. 1, *a*). Используя этот коэффициент в выражении (3), получим минимально допустимое зарядное напряжение как функцию длины разрядного промежутка (рис. 1, δ), способное реализовать электрический пробой при заданной геометрии электродной системы, проводимости воды и емкости накопителя.



Рисунок 1 – Максимально возможный коэффициент предпробивных потерь (*a*) и минимальное допустимое зарядное напряжение (б) в функции длины разрядного промежутка.

В электродных системах ИЭРИЭ, применяемых в РИТ, поперечное сечение и величина оголенной поверхности используемых электродов определяются, во-первых, способностью электрода противостоять многократным импульсным механическим нагрузкам, возникающим при электрическом взрыве в воде, и, во-вторых, ресурсом работы электродной системы без замены электродов, определяемым технологическим процессом. При этом, как правило, в технологических устройствах используется водопроводная вода с электропроводностью, соответствующей данному региону. Электрическая емкость накопителя ИЭРИЭ может варьироваться в достаточно широких пределах с точки зрения как запасаемой энергии, так и временных характеристик процесса. В этой связи, в зависимости от конкретной технологии, радиус поперечного сечения применяемых электродов варьируется в пределах от 2 до 5мм. Длина оголенной части при этом может быть от 20 до 100 мм.

Вышеуказанные параметры существенным образом сказываются на величине предпробивных потерь [1] и могут вызвать сложности на пути к достижению оптимального режима работы конкретного технологического устройства, в частности, в достижении режима работы ИЭРИЭ, близкого к согласованному.

Получение каких-либо обобщающих аналитических выражений или графических зависимостей затруднено, но на основании вышеприведенных рассуждений (рис.1) можно проследить тенденцию изменения предпробивных потерь и зарядного напряжения при изменении любого из рассматриваемых параметров.

Пороговое напряжение *Uo* представим как функцию радиуса электрода и длины разрядного промежутка в более уточненном виде:

$$Uo(r_{e},l) = 1.83 \cdot 10^{6} \cdot \frac{ln\left(\frac{\sqrt{1+\frac{l}{r_{e}}} + \sqrt{\frac{l}{r_{e}}}}{\sqrt{1+\frac{l}{r_{e}}} - \sqrt{\frac{l}{r_{e}}}}\right)}{\sqrt{\frac{l}{r_{e}}} \cdot \sqrt{1+\frac{l}{r_{e}}}} \cdot l$$
(5)

и построим зависимости Uo(l) при различных радиусах электрода r_e (рис. 2).



Рисунок 2 – Пороговое напряжение *Uo* в функции длины разрядного промежутка *l* для разных значений радиуса электрода *r*_e

Как видно из полученных зависимостей (рис. 2), с увеличением толщины электрода пороговое напряжение увеличивается.

Максимально возможный коэффициент предпробивных потерь f_{max} как функция длины разрядного промежутка для вышеиспользованных параметров (рис. 2) определялся при соответствующей подстановке выражений (3) и (5) в виде корней уравнения:

$$Unp - Uo = 0. (6)$$

При этом, как видно (рис. 3, a), с ростом толщины электрода коэффициент предпробивных потерь уменьшается. Это объясняется тем, что в данном случае предпробивные потери Wn с увеличением толщины электрода растут медленнее, чем растет запасаемая энергия. В то же время минимально допустимое зарядное напряжение (рис. 3, б) в зависимости от толщины электрода растет аналогично пороговому напряжению.



Рисунок 3 – Максимально возможный коэффициент предпробивных потерь (*a*) и минимально допустимое зарядное напряжение (*б*) в функции длины разрядного промежутка при разных значениях радиуса электрода



Рисунок 4 – Максимально возможный коэффициент предпробивных потерь для заданных условий (*a*) и минимально допустимое зарядное напряжение при изменении оголенной поверхности электрода и емкости накопителя (б).

Представляет интерес определение максимально возможного коэффициента предпробивных потерь f_{max} и минимально допустимого зарядного напряжения *Uз* в зависимости от длины оголенной поверхности электрода l_e и емкости накопителя *C*. Примем радиус электрода r_e равным 4 мм, как наиболее распространенный в устройствах РИТ. Одновременно примем два значения длины оголенной поверхности – 20 и 80 мм, а также два значения величины емкости – 3,22 и 32,2 мкФ. Электропроводность воды принимаем прежней – $\sigma = 0,055 (OM \cdot M)^{-1}$.

На рис. 4, а представлены зависимости максимально возможного коэффициента предпробивных потерь f_{max} от длины разрядного промежутка для вышеуказанных условий. Как видно, увеличение оголенной поверхности электродов приводит к росту предпробивных потерь, а рост емкости накопителя – к их уменьшению.

Как показывают зависимости, представленные на рис. 4, б минимально допустимое, для обеспечения пробоя, зарядное напряжение U3 (в сравнении с пороговым напряжением Uo) с ростом оголенной поверхности электрода должно расти. В то же время увеличение емкости накопителя приводит к существенному уменьшению минимального зарядного напряжения и при этом изменение оголенной поверхности сказывается незначительно.

Выводы. 1. Полученные результаты позволяют утверждать, что рассмотренный режим работы ИЭРИЭ, близкий к согласованному для РИТ, использующих высоковольтный пробой в воде, характеризуется недопустимо большими (>> 50 %) предпробивными потерями энергии. Кроме того, такой режим крайне нестабилен в реализации пробоя и не гарантирует выделение запасенной в накопителе энергии в течение импульса тока. Поэтому такой режим нельзя принимать как оптимальный для РИТ. 2. В то же время показанная возможность построения приведенных зависимостей по конкретным исходным данным может служить ориентиром для оптимизации создаваемых ИЭРИЭ. Очевидно, дальнейшие исследования в направлении оптимизации режима работы электроразрядных устройств для различных РИТ должны, в первую очередь, опираться на ранее полученное условие минимума предпробивных потерь энергии [3], развивая его в сторону режима, близкого к согласованному.

Список литературы: 1. Кужекин И.П. Исследование пробоя жидкости в неоднородном поле при прямоугольных волнах напряжения / И.П. Кужекин // Журн. техн. физики. – 1966. – Т. 36, вып. 12. – С. 2125-2130. 2. Кривицкий Е.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде / Е.В. Кривицкий, В.В. Шамко. - К.: Наук. думка, 1979. - 208 с. 3. Вовченко А.И. Синтез емкостных энергоисточников для высоковольтных электротехнологических установок с учетом предразрядных процессов / А.И.Вовченко, Н.П. Дивак / Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 18. – С. 61-67.

Поступила в редколлегию 20.09.2011.

Л.З. БОГУСЛАВСКИЙ, канд. техн. наук, ИИПТ НАН Украины, Николаев; *Н.С. НАЗАРОВА*, канд. техн. наук, ИИПТ НАН Украины, Николаев; *Л.Е. ОВЧИННИКОВА*, канд. техн. наук, ИИПТ НАН Украины, Николаев; *Д.В. ВИННИЧЕНКО*, ИИПТ НАН Украины, Николаев; *В.В. ДИОРДИЙЧУК*, ИИПТ НАН Украины, Николаев; *С.С. КОЗЫРЕВ*, канд. техн. наук, Национальный университет кораблестроения, Николаев

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОУГЛЕРОДА ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ РАЗРЯДНОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ ГАЗООБРАЗНОГО УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Розроблено систему моніторингу керованого синтезу нановуглецю шляхом розрядноімпульсної обробки газоподібної сировини, яка дає змогу контролювати параметри плазмохімічної реакції в реальному часі, створювати бази даних для наступної обробки та аналізу з метою синтезу наноматеріалів з заданими властивостями.

The monitoring system for controlled synthesis of nanocarbon by means of discharge-pulse processing of gaseous raw materials was developed. Monitoring system allows to manage the parameters of plasmachemical reaction in real time and to create databases for further processing and analysis to obtain nanomaterials with desired properties.

Разработана система мониторинга управляемого синтеза наноуглерода путем розрядноимпульсной обработки газообразного сырья, дающая возможность контролировать параметры плазмохимической реакции в реальном времени, создавать базы данных для следующей обработки и анализа с целью синтеза наноматериалов с заданными свойствами.

Введение. Анализ современного состояния исследований синтеза наноуглерода показал, что в настоящее время отсутствуют технологии быстрого и качественного получения макроколичества материала, которое необходимо для промышленных масштабов производства [1]. Проведенные в ИИПТ НАН Украины исследования по применению высокочастотной дуги для синтеза наноуглерода из газообразных сред показали возможность получения твердой углеродной сажи при электроразрядном воздействии на газообразные углеводороды [2]. При использовании этого метода удается получить макроколичества наноматериала, при этом устраняются трудоемкие операции сушки, очистки и разделения по качественному и фракционному составу полученного наноуглерода, необходимые при электровзрывной деструкция углеводородных жидкостей. Установлено, что для синтеза наноуглерода из газообразных углеродсодержащих сред необходимо использовать неравновесную плазму (то есть создавать специальные условия синтеза). Основным препятствием на пути совершенствования данных способов синтеза наноуглерода в промышленных объемах является 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.

Целью работы является создание системы мониторинга параметров плазмохимического синтеза наноуглерода из газообразного углеродсодержащего сырья при его высокочастотной разрядноимпульсной обработке в экспериментальной установке, что позволит создавать условия для синтеза материала с заданными свойствами.

Управляемая установка для синтеза наноуглерода. Для обеспечения необходимой температуры плазмохимического синтеза наноуглерода из газообразных сред необходимы газоразрядные источники плазмы с видимым диапазоном свечения, что требует создания импульсного генератора с диапазоном значений напряжения от 3 до 20 кВ. Известно, что количество продуктов реакции определяется мощностью источника, при этом остается открытым вопрос о распределении характеристик полученных наноматериалов в зависимости от мощности. С целью исследования влияния мощности источника на свойства наноматериалов для экспериментальной установки был разработан управляемый источник, позволяющий варьировать мощность в широких пределах от 30 Вт до 3 кВт. Характер разряда существенно зависит от частоты, поэтому разработанный источник имеет возможность изменения частоты следования импульсов напряжения с коротким фронтом в широком диапазоне от 1 до 100 кГц. В качестве источника энергии для экспериментальной установки плазмохимического синтеза наноуглеродов из газообразного сырья разработан управляемый высоковольтный высокочастотный импульсный генератор с регулируемым выходным напряжением от 3 до 20 кВ и частотой до 100 кГц. Структурная схема генератора представлена на рис. 1.



Рисунок 1 – Структурная схема управляемого импульсного генератора

Система контроля и управления генератора построена на ШИМ контролере КАЗ846, который используется для установки частоты работы инвертора, а также для осуществления защиты ключей по току. Разработанный управляемый генератор имеет следующие особенности: автоматическую компенсацию обратной связи; автоматическое ограничение тока импульсов; автоматическую коррекцию симметрии в преобразователях; улучшенные нагрузочные характеристики; дифференциальный усилитель токового сигнала; подавление пульсаций управляющего сигнала; защиту от перенапряжений; осуществляет генерацию импульсов с частотой до 500 кГц.

Система мониторинга. С целью обеспечения текущего контроля реакционных параметров и создания базы данных для дальнейшего анализа результатов разработана система мониторинга параметров процесса в реакторе и средства контроля и управления электрическими параметрами в разрядной цепи. Для определения структуры системы мониторинга проведен анализ информационных координат плазмохимического синтеза наноуглерода при высокочастотной разрядноимпульсной обработке газообразного углеродсодержащего сырья. К информационным координатам в первую очередь необходимо отнести давление в реакторе, по величине которого можно судить о скорости приращения объема, что соответствует скорости протекания плазмохимической реакции в газообразной углеродсодержащей среде при определенной температуре. К информационным координатам относятся также температурные или тепловые характеристики, определяющие тип протекающих реакций. Для поддержания стационарного процесса или для смещения равновесия реакции в нужном направлении надо обеспечить необходимую скорость подачи и отвода газа при непрерывном контроле давления и температуры. Поэтому система мониторинга параметров процесса синтеза в реакторе содержит средства контроля текущего давления и температуры. Контроль энергопотребления и электродинамических характеристик процесса синтеза осуществляется с помощью электронного счетчика электроэнергии и двухканального цифрового осциллографа со специально разработанным малогабаритным делителем напряжения для измерения напряжений до 20 кВ с выходным активным сопротивлением 20 кОм и собственной индуктивностью 40 нГн. Он позволяет получать на осциллографе с входной емкостью 20 пФ неискаженный сигнал частотой до 100 МГц.

На основании проведенного анализа создана управляемая экспериментальная установка, которая позволяет осуществлять управляемый плазмохимический синтез наноуглеродных материалов из газового углеродсодержащего сырья, с системой мониторинга параметров. Проведение экспериментальных исследований на данной установке дают возможность создать достаточную базу данных для построения адекватных зависимостей количественных характеристик синтезируемых углеродных наноматериалов путем объемной электроразрядной обработки углеродных сред от входных параметров плазмохимического синтеза. Более глубокая обработка полученной базы экспериментальных данных позволит построить закон распределения размера наночастиц углерода и провести оценку доверительных интервалов статистических моментов необходимую для оценки точности полученных количественных зависимостей характеристик полученного наноматериала от энергетических параметров процесса плазмохимического синтеза. Структурная схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.



Рисунок 2 - Структурная схема экспериментальной установки

Установка для управляемого плазмохимического синтеза наноуглерода из газообразного сырья состоит из реактора (1) для плазмохимического синтеза, конструкция которого определяется температурными или тепловыми характеристики реакции, статическим и динамическим давлением, возникающем в реакционном объеме. В реакторе установлены подвижный (2) и неподвижный (3) электроды, форма и расположение которых зависит от вида разряда. Реактор имеет каналы для подвода исходного сырья (4) и отвода газообразных продуктов реакции (5), установленные с помощью гермовводов (6). Высоковольтный высокочастотный генератор (7) обеспечивает зажигание одного из видов разрядов, являющихся источником плазмы оптического диапазона спектра свечения. Система мониторинга (8) динамических характеристик плазмохимической реакции (давления и температуры в реакторе; энергии, потребляемой установкой) получает информационные сигналы с измерителя электрической энергии (9); датчика температуры в реакторе (10); канала для измерения давления (11), установленного в баке с помощью герметичного ввода (6). Контроль тока и напряжения в разрядной цепи осуществляется осциллографом (13) с помощью делителя напряжения (15) и датчика тока (14). Результаты мониторинга могут передаваться на персональный компьютер (12) для последующей обработки и анализа.

Функциональная схема системы мониторинга процесса синтеза наноуглеродных материалов экспериментальной установки представлена на рис. 3.



Рисунок 3 – Блок-схема системы мониторинга процесса синтеза наноуглерода



Рисунок 4 – Окно программы для регистрации напряжения и температуры в реакторе в реальном времени

Разработано программное обеспечение для микроконтроллера ATMega16, позволяющее использовать два режима работы системы мониторинга:

- режим измерения давления и температуры с индикацией на жидкокристаллическом мониторе (ЖКИ);
- режим регистрации данных с записью в постоянную память SD/MMC для последующего анализа с автоматической передачей данных на персональный компьютер ПК.

Разработано программное обеспечение для ПК, позволяющее во время

регистрации параметров визуально на мониторе наблюдать изменение давления и температуры в реакторе, сохранять результаты измерений в постоянной памяти для последующего анализа (рис. 4).

С целью автоматической регулировки разрядного промежутка для стабильного зажигания разряда и поддержания оптимальной для синтеза наноуглерода длины импульсно-периодической дуги разработана система автоматического регулирования длины разрядного промежутка (рис. 5).



Рисунок 5 – Внешний вид системы автоматического регулирования длины разрядного промежутка

Разработана микропроцессорная система управления регулировкой длины разрядного промежутка с соответствующим программным обеспечением, структурная схема которой показана на рис. 6.

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



Рисунок 6 – Структурная схема системы автоматического регулирования длины разрядного промежутка

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. 7).

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 [3]. С помощью нормализующего преобразования начальные данные преобразуются таким образом, чтобы иметь распределение Гаусса. Далее для нормализованных данных находят оценки доверительных интервалов статистических моментов случайной величины. На основе обратного преобразования вычисляют оценки доверительных интервалов статистических моментов начальной негауссовской случайной величины. 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 имеет большой эксцесс (>3).



Рисунок 7 – Интерфейс программы для определения размеров частиц

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

Выводы. Создана экспериментальная установка с системой мониторинга для управляемого плазмохимического синтеза наноуглерода из газообразного сырья, которая дает возможность вести целенаправленный поиск режимов получения наноуглеродных материалов различных форм и размеров путем варьирования электрических и гидродинамических параметров источника плазмы и изменения условий протекания реакции с помощью высоковольтного высокочастотного генератора с системой автоматического регулирования длины разрядного промежутка. Разработанная система мониторинга процесса синтеза наноуглерода позволяет контролировать параметры плазмохимической реакции в реальном времени, создавать базы данных для последующей обработки и анализа с целью синтеза наноматериалов с заданными свойствами. Список литературы. 1. Касумов, М.М., Покропивный В.В. Сравнительный анализ методов синтеза фуллеренов и углеродных наноструктур // Тез. докл. Х Междунар. конф. «Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов», 2007. – Киев, 2007. – С. 492-493. 2. Пат. 95543 Україна МПК С01В 31/02 Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів / Богуславський Л.З., Вінниченко Д.В., Назарова Н.С.; заявник і патентовласник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. – № а 2010 01186 заявл. 05.02.2010; опубл. 10.08.2011, бюл. № 15. – 9 с. 3. Приходько С.Б. Інтервальне оцінювання параметрів стохастичних диференціальних систем на основі модифікації узагальненого методу моментів // Матеріали XIII Міжнарод. конф. з автоматичного управління. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2007. – С. 69-75.

Поступила в редколлегию 18.10.2011

УДК621.3.002.5

Н.И.БОЙКО, д-р техн. наук, глав. науч. сотр., доцент, НТУ «ХПИ»; *Л.С.ЕВДОШЕНКО*, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»; *В.М.ИВАНОВ*, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»; *С.Ф.КОНЯГА*, аспирант, НТУ «ХПИ»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ПЛАЗМОКАТАЛИТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Розглянуто вплив електричних розрядів на протікання плазмохімічних процесів при паровій конверсії метану у синтез-газ. Експериментально одержано бар'єрний розряд у високовольтному макеті бар'єрного реактора, який заповнено промисловим Ni каталізатором типу ДІАП.

Influence of electric discharges on the running of plasma-chemical processes in steam conversion of methane to sin-gas is considered. Dielectric barrier discharge is obtained in high voltage scale model of barrier reactor which was filled by industrial Ni catalyst of GIAPtype.

Рассмотрено влияние электрических разрядов на протекание плазмохимических процессов при паровой конверсии метана в синтез-газ. Экспериментально получен барьерный разряд в высоковольтном макете барьерного реактора, заполненного промышленным Ni катализатором типа ГИАП.

Существует ряд подходов для модернизации современных тепловых и плазмохимических технологий конверсии, риформинга углеводородного газообразного сырья в ценные содержащие водород газы. К таким газам относится и синтез-газ ($m \times H_2 + n \times CO$), где m, n-целые числа. В этих подходах используются электрические разряды [1-3]. Синтез-газ является ценным сырьем для получения чистых жидких топлив, в том числе для двигателей внутреннего сгорания. Газы, обогащенные водородом, могут непосредственно применяться в технологиях модернизации работы двигателей внутреннего сгорания.

В [1] отмечается, что наиболее перспективным подходом при получении водорода в водородной энергетике является подход с использованием паро-
вой конверсии метана. Указывается, что этот вариант конверсии метана весьма перспективен для промышленного применения, однако к настоящему времени недостаточно изучен. Из опубликованных результатов исследований различных групп ученых (в том числе из приведенных выше источников) слелует, что рациональное использование совместного воздействия повышенной температуры, катализаторов и электрических разрядов дает значительный синергический эффект при конверсии чистого метана в синтез-газ и, можно предположить, его конверсии в составе различных исходных газовых смесей. Противоречивы сведения относительно селективности в получении водорода, при использовании различных видов разрядов. Эти разряды можно разделить на две большие группы. Первая группа - канальные (или неоднородные) разряды, к которым относятся искровые, дуговые, скользящие разряды. Вторая группа – объемные разряды, к которым относятся коронные и барьерные. Часть исследователей [1] приводят результаты, свидетельствующие о низкой селективности по водороду и синтез-газу при использовании объемных разрядов. У других исследователей [2,3] результаты по этому показателю составляют до 70 % и более. Возможно, дело в различных условиях и режимах горения объемных разрядов. В пользу объемных разрядов для промышленного применения говорит такой известный факт, что именно они успешно прошли многолетнюю промышленную апробацию в таких областях практического применения как использование в электрофильтрах (коронный разряд) и использование для генерирования озона в промышленных озонаторных установках (барьерный разряд).

Целью данной работы является экспериментальное определение возможности использования импульсного барьерного разряда совместно с никелевыми катализаторами типа ГИАП в плазмокаталитических технологиях.

Для достижения поставленной цели были экспериментально определены электрические характеристики (активное сопротивление и емкость) отдельного элемента промышленного никелевого катализатора в виде цилиндрического кольца, создан и испытан на высоком импульсном напряжении реактор со стеклянным барьером и засыпкой указанным промышленным никелевым катализатором. Элемент катализатора имел следующие размеры: высота цилиндра – ~15 мм, диаметр цилиндра – ~15 мм, центральное осевое отверстие в цилиндре имело диаметр 4 ÷ 5 мм. Измеренное мегаомметром при напряжении 500 В и комнатной температуре активное сопротивление между торцами такого одиночного элемента составило ~20 МОм. Емкость между внутренней цилиндрической поверхностью кольца и его внешней цилиндрической поверхностью составила ~15 пФ. Отсюда следует, что относительная диэлектрическая проницаемость материала этого катализатора NiO на носителе Al₂O₃ при комнатной температуре составляет примерно $\varepsilon = 25$.Схема испытаний приведена на рис. 1.



Рисунок 1 – Схема испытаний: ИТ – импульсный повышающий трансформатор; C₁, R₁ – емкость и активное сопротивление диэлектрического барьера, пробивное напряжение которого значительно больше, чем у объема, заполненного катализатором; C₂, R₂ – емкость и активное сопротивление объема в реакторе, заполненного катализатором

Эскиз барьерного реактора с никелевым катализатором приведен на рис. 2.



Рисунок 2 – Барьерный реактор с катализатором: *а* – вид спереди; *б* – осевое сечение; 1 – внешний низковольтный трубчатый электрод внутренним диаметром 50 мм; 2 – внутренний осевой стержневой высоковольтный электрод внешним диаметром 14 мм; 3 – трубчатый стеклянный барьер внешним диаметром 15 мм и с толщиной стенки в трубке 1 мм; 4 – кольцевой элемент промышленного никелевого катализатора типа ГИАП.

Испытания данного макетного реактора проводились при воздействии на него импульсами отрицательной полярности. Длительность воздействующего отрицательного импульса составляла 8 мкс при амплитуде примерно 14 кВ. Частота следования импульсов составляла 25000 имп/с. Мощность, выделяемая в реакторе, составила до 200 Вт. За 6 минут работы в таком режиме реактор нагрелся от 25 °C до 110 °C. В зазорах между внешней поверхностью стеклянного барьера и прилегающими к ней кольцевыми элементами катализатора имело место сиренево-синее свечение. Между центральным высоко-

вольтным электродом и охватывающей его внутренней поверхностью стеклянного барьера также имело место свечение. Испытания проводились в воздухе при атмосферном давлении.

Макетный реактор с засыпкой из элементов промышленного никелевого катализатора был испытан и без барьера, поскольку барьер удорожает и усложняет конструкцию. Режим без барьера оказался работоспособным, однако допустимая рабочая мощность, вводимая в реактор, напряжение и ток в реакторе существенно меньше, чем с барьером. Допустимые мощность и ток меньше в 2÷3 раза, а допустимое напряжение меньше примерно на 20 %. При превышении допустимых величин происходил пробой в реакторе и имел место аварийный режим короткого замыкания.

В известных авторам исследованиях по данным научной литературы для паровой конверсии метана в синтез-газ не использовались промышленные никелевые катализаторы. В них использовались модельные катализаторы с характерными размерами гранул ~1 мм и низким содержанием никеля в гранулах (элементах) – до 3 %. Кроме того, в работе [2], где приведены лучшие, по нашему мнению, результаты при использовании барьерного разряда совместно с никелевым катализатором и температурой 500 – 700 °C и за счет этого получен значительный синергический эффект, использовались не импульсные напряжения и токи, а синусоидальные с характерной частотой 76 кГц. Использование импульсных высоких напряжений и сильных токов является одним из важных резервов для дальнейшего повышения эффективности конверсии и уменьшения удельных энергозатрат при паровой конверсии метана в синтез-газ до 1 эВ/молекула и ниже при промышленном использовании. В работе [2] использовался реактор «осевая проволока в трубе». Диаметр проволоки 1 мм, а внутренний диаметр трубы 6 мм. В нашем макетном реакторе «осевой стержень в трубе» диаметр стержня составлял 14 мм, а внутренний диаметр трубы составлял 50 мм, что предотвращало такой перегрев осевого проводника, который имел место в [2]. Использованный нами промышленный катализатор типа ГИАП содержал существенно больше никеля (до 10 %), чем использовавшиеся ранее в похожих исследованиях катализаторы. В этом, возможно, содержится еще один резерв увеличения эффективности и уменьшения удельных энергозатрат при паровой конверсии метан содержащих газов с использованием объемных разрядов.

Таким образом, экспериментально показано, что использование объемных разрядов при плазмокаталитических технологиях с промышленными никелевыми катализаторами типа ГИАП с повышенным содержанием никеля возможно.

Важно отметить, что использование барьерного разряда позволяет избежать весьма нежелательного выпадения углерода в виде сажи на поверхности никелевого катализатора при конверсии метана, в том числе и при наиболее распространенном в промышленности режиме при классической плазмокаталитической конверсии метана, когда H₂O/CH₄=2 [2].

Традиционная паровая конверсия метана без использования электрических разрядов и катализаторов идет по реакции

 $CH_4 + H_2O + 2,1 \ \Im B = CO + 3H_2$

при температуре 1300 – 1900 °К и давлении выше 0,5 МПа [1].

Плазмокаталитическая паровая конверсия с использованием электрических разрядов в рациональных режимах по аналогичной реакции с аналогичным выходом синтез-газа, близким к 100 %, возможна при температуре 800 – 900 °К и более низком избыточном давлении (вплоть до атмосферного), что обеспечивает существенную технологическую и энергетическую выгоду, так как не требуется дополнительно греть реактор и обеспечивать 5-тикратное избыточное давление. При этом многократно возрастает ресурс реактора. Для поиска рациональных режимов электрических разрядов следует провести соответствующие исследования в условиях, близких к промышленным условиям.

Список литературы: 1. *Пушкарев А.И.* Конверсия метана в низкотемпературной плазме / *А.И. Пушкарев, Ai-MinZhu, Xiao-SongLi, P.B. Сазонов* // Химия высоких энергий. – 2009. – Т. 43, № 3. – С. 202-208. **2.** *Nozaki T.* Dissociation of vibrationally excited methane on Ni catalyst. Part 1. Application to methane steam reforming / *T. Nozaki, N. Muto, S. Kado, K. Okazaki* // Catalysis Today. – 2004. – 89. – P. 57-65. **3.** *Mishra L.N.* Conversion of methane to hydrogen via pulsed corona discharge / *L.N. Mishra, K. Shibata, H. Ito, N. Yugami, Y. Nishida* // Journal of Natural Gas Chemistry. – 2004. – 13. – P. 82-86.

Поступила в редколлегию 13.10.2011

УДК 621 311

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

О ПОВЫШЕНИИ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В ГРОЗОВОЙ СЕЗОН

У статті розглянуто заходи щодо зниження числа вимикань споживачів електроенергії в грозовий сезон і час відновлення електропостачання в розподільчих 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 выключений потребителей электроэнергии в грозовой сезон и время восстановления электроснабжения в распределительных электрических сетях.

1 Введение

К распределительным сетям (PC) в энергосистеме (рис. 1) относятся: электрические подстанции напряжением 35-220 кВ (питающие центры), трансформаторные подстанции 6-10/0,4 кВ и линии электропередач напряжением 0,4-220 кВ. В электросетевых компаниях нередко к распределительным сетям относят лишь объекты напряжением ниже 10 кВ, а объекты напряжением 35-220 кВ называют высоковольтными сетями.

Нарушения в работе PC, как правило приводят к отключению потребителей электроэнергии. В сельской местности, в основном, для передачи электроэнергии используются воздушные линии электропередачи, подверженные воздействиям грозовых разрядов. Во время грозового сезона количество отключений потребителей возрастает. По статистическим данным примерно 17 % от общего числа отключений в PC происходит во время грозы. В среднем число грозовых часов в год составляет 20-60. Следовательно, 17 % отключений приходится менее чем на 1 % времени эксплуатации PC. Статистические данные свидетельствуют о наличии серьезной проблемы с грозовыми отключениями.



Рисунок 1 – Блок схема энергосистемы: ЭС – электрическая станция, ПС – электрическая подстанция магистральных сетей, ПЦ – питающий центр распределительных сетей, ТП – трансформаторная подстанция, П – потребитель электроэнергии, ЛЭП – линия электропередачи

Еще одна не менее важной проблемой в PC является время определения места повреждения. При эксплуатации PC напряжением 0,4-10 кВ персонал часто вынужден производить неоднократное включение на короткое замыкание (КЗ) ЛЭП, чтобы определить место повреждения. На проведение таких действий требуется большое время. Кроме того существенно снижается ресурс выключателей. В настоящее время в связи с переходом на RAB регулирование тарифов время перерыва питания потребителей становится одним из важнейших показателей, влияющих показателей в оценке деятельности энергоснабжающих организаций. Превышение, установленного в тарифе времени перерыва питания потребителей к штрафным санкциям в

размере до 2 % от общей выручки предприятия. Таким образом, перед энергоснабжающими организациями стоит задача выполнения указанного параметра и даже его снижение относительно норматива, поскольку при снижении показателя относительно норматива предприятию начисляется премия в размере до 2 % от норматива. Наибольшее влияние на выполнение этого параметра оказывают сети 0,4-20 кВ в которых резервирование энергоснабжения охватывает не всех потребителей.

2 Нормативные документы по молниезащите распределительных сетей

Проектирование молниезащиты объектов электроэнергетики России осуществляется в соответствии с требованиями нормативных документов [1-4]. Принято выделять в системе молниезащиты [4] устройства защиты от прямых ударов молнии (внешняя молниезащитная система) и устройства защиты от вторичных воздействий молнии (внутренняя молниезащитная система). Кроме того, на энергообъектах должна быть выполнена защита от набегающих волн с отходящих линий [3].

Действующие нормативные документы имеют следующие недостатки:

- Имеются противоречия в части выполнения защиты от прямых ударов молнии, что вызывает обоснованные затруднения в проектировании защиты энергообъектов от прямых ударов молнии и в оценке ее надежности.
- В документах [1-3], по которым практически на всех энергообъектах выполнена молниезащита, защита от вторичных воздействий молнии предусматривается лишь в очень ограниченном виде.
- Параметры тока молнии, принимаемые для расчетов вторичных воздействий, сильно различаются в различных документах.
- Приведенные карты интенсивности грозовой деятельности давно не обновлялись.

В целом указанные нормативные документы не отвечают современным требованиям.

В 2010 г. введены в действие новые нормативные документы по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) на электрических подстанциях [5], в которых рассмотрены также вопросы защиты от вторичных воздействий молнии при выполнении молниезащиты подстанций. Этот документ лишь частично устраняет указанные недостатки.

Молниезащита распределительных сетей напряжением 0,4-10 кВ фактически сводится к установке устройств защиты от грозовых перенапряжений на ТП.

3 Методы повышения грозоупорности распределительных сетей

Обеспечение необходимой грозоупорности вновь строящихся объектов РС должно выполняться при разработке проектных решений по молниезащи-

те этих объектов. Решение этой проблемы невозможно без создания новых современных нормативных документов.

Снижения числа грозовых отключений в действующих РС может быть достигнуто при последовательной реализации следующих работ.

- 1) Проведение комплексного обследования состояния молниезащиты объектов PC.
- Анализ результатов обследования с целью выявления имеющихся недостатков и определения фактического состояния молниезащиты.
- Определение грозопоражаемости объектов РС и числа грозовых отключений с применением современных методов расчета.
- Выбор мероприятий устранению установленных дефектов и по реконструкции молниезащиты. Разработка технико-экономического обоснования.
- 5) Разработка проекта реконструкции молниезащиты. Выполнение строительно-монтажных работ.

При обследовании выполняются следующие электрометрические измерения и исследования.

Сбор информации: по статистике отключений ВЛ в различное время года в сетях напряжением 6-10 кВ, 35 кВ и 110 кВ; статистические данные о времени определения мест КЗ на ВЛ; принципиальные схемы распределительных сетей, включая питающий центр с подходящими ЛЭП; профили трасс ВЛ; типы опор и изоляторов, длины пролетов между опорами, наличие тросовой защиты и типы тросов ВЛ различного класса напряжения; места установки и типы ОПН или разрядников на ВЛ; статистические данные повреждения оборудования ПС и неправильной работы устройств РЗА в грозовой сезон; методы и средства МЗ ПС; места установки и типы ОПН или разрядников на ПС; типы молниеотводов на ПС; защита подходов ВЛ к ПС.

Электрометрические измерения: определение реальных схем заземляющих устройств молниеотводов ПС и опор ВЛ; измерение значений удельного электрического сопротивления грунта на территории ПС и по трассе ВЛ; измерение значений импульсных сопротивлений заземляющих устройств молниеотводов и опор ВЛ; измерения распределения импульсных потенциалов по заземляющему устройству ПС; определение значений импульсных перенапряжений во вторичных цепях при имитации удара молнии в молниеотводы ПС.

По результатам измерений оформляются соответствующие Протоколы и составляются поопорные схемы (рис. 2).

Расчеты грозопоражаемости и числа грозовых отключений выполняются на основании данных, полученных при проведении обследования, и сопоставляются со статистическими данными. Выбор мероприятий по снижению числа отключений производится также с учетом результатов обследования.



Рисунок 2 – Пример поопорной схемы фидера 10 кВ

К мероприятиям по снижению числа грозовых отключений относятся: реконструкция заземляющих устройств ПЦ и опор ВЛ; реконструкция системы молниезащиты ПЦ; установка устройств по ограничению импульсных перенапряжений (ОПН, длинно-искровые разрядники); применение тросовой защиты; замена устаревшего оборудования. По выбору мероприятий дается технико-экономическое обоснование.

4 Метод снижения времени определения места повреждения в РС

Существенным фактором, влияющим на время перерыва энергоснабжения потребителей является время поиска места повреждения. Ранее для сетей 6-10 кВ было выпущено несколько типов электромеханических устройств (индикаторов неисправностей) для определения места повреждения типов УПУ (указатель поврежденного участка), УТКЗ (указатель тока КЗ), АУПН (автоматический указатель поврежденного направления). Все они сигнализируют о прохождение через них тока КЗ, что позволяет более оперативно находить место повреждения за счет сокращения зоны обхода поврежденной линии. Однако, низкие эксплуатационные характеристики устройств не позволили им найти широкое применение в сетях 6-10 кВ.

Индикатор неисправностей включает типовой набор элементов: датчик магнитного поля, сигнализатор механического типа (блинкер) или светодиодного типа, блок сравнения, элемент питания и хомут для установки устройства на провод линии. Принцип работы очевиден. Перед монтажом устанавливают порог тока (магнитного поля) с помощью механического набора (например, dip-переключатели). Сигнализатор будет срабатывать при превышении уровня магнитного поля относительно заданного и возвращаться в исходное положение при восстановлении рабочего режима. Из серийновыпускаемых индикаторов известны:

- индикатор повреждений FI-3A1F фирмы Creative Distribution Automation Co., Ltd, Китай;
- индикатор неисправностей LineTroll 110Е компании NorTroll AS, Норвегия;
- индикатор короткого замыкания типа ИКЗ-2 НПП «Антракс», Россия.

Вышеизложенный подход наряду с положительными свойствами (низкая стоимость, простота) имеет ряд недостатков, которые снижают эксплуатационные характеристики устройства. Во-первых, ограниченная измерительная информация приводит к упрощенной логике работы. В частности, превышение уставки с последующим переходом линии в режим холостого хода может быть ошибочно интерпретирован как аварийное с переходом индикатора в активный режим. Событие «успешное АПВ» не может быть идентифицировано. Накопление данных о происшедших событиях, представляющее несомненный интерес, отсутствует. Во-вторых, ограниченное число элементов схемы реализации провоцирует простое решение: использование литиевого элемента питания, имеющего ряд несомненных достоинств: длительный срок службы, достаточную высокую емкость, широкий температурный диапазон, низкую величину саморазряда. Однако наличие одного источника питания вряд ли способно обеспечить надежность, достаточную для данных условий применения. Кроме этого возникает важный вопрос: можно ли отнести указанное устройство к классу необслуживаемых. В-третьих, в процессе эксплуатации применяемые типы сигнализации (блинкер, светодиоды, ксеноновые вспышки и т.п.) могут временно терять свою функциональность из-за внешних воздействий: обледенение, загрязнение. Поэтому очевидно решение – применение беспроводных технологий, а это усложнение, удорожание устройства и снижение ресурса автономного питания. В-четвертых, настройка устройств (программирование уставок) только перед его монтажом вряд ли может удовлетворить эксплуатационный персонал.

Сотрудники НПФ «ЭЛНАП» и МЭИ предложили техническое решение, которое совмещает функции мониторинга, сигнализации и регистрации в одном устройстве. Функциональная схема устройства представлена на рис. 3.

Устройство имеет четыре функциональных узла:

- блок питания;
- измерительные цепи:
- контроллер:
- трансивер.

Принципиальным решением разработчиков является использование нескольких источников питания:

- токовый преобразователь (ТП), осуществляющий так называемый индукционный отбор для целей питания;
- ионистор С1 для питания устройства при токах в линии менее 3 А в течение 24 часов;
- литиевая батарея GB1 при отсутствии питания от первых двух источников.



Рисунок 3 – Функциональная схема

При этом выход из строя батареи не приводит к отказу устройства. В этом случае, если время отключения напряжения линии будет более 24 часов, некоторые сервисные функции будут недоступны до момента появления тока в линии.

Измерительные каналы предназначены для измерения мгновенных значений тока (два диапазона: 1кА и 10 кА), температуры (от -40°С до 200°С) и определения наличия напряжения. Измерительной информации достаточно для идентификации состояний согласно классификации (рис. 4) и определения тип события (см табл. 2). События накапливаются в протоколе в формате: время, прошедшее с начала события, значение тока, температура провода, вид события.

Модуль трансивера предназначен для реализации съема данных с устройства посредством специализированного терминала или ноутбука, оснащенного радиочастотным модемом. Частота передачи составляет 868,0 МГц при мощности сигнала 10мВт.

Контроллер выполняет «классические» функции: управление функцио-

нальными узлами устройства и обработка данных поступающих с первичных преобразователей.



Рисунок 4 - Классификация состояний

В предлагаемом устройстве реализована также функция регистрации импульсных токов, предшествующих возникновению КЗ. Эта функция позволяет определить: являлись ли причиной возникновения КЗ грозовые перенапряжения.

Опытная апробация устройства проведена на воздушных линиях электропередачи 10 кВ.

Заключение

В грозовой сезон надежность электроснабжения потребителей снижается. Существенно возрастает число отключений и время перерыва в электроснабжении.

Для повышения грозоупорности на действующих PC необходимо провести комплексное обследование молниезащиты, по результатом которого могут быть разработаны технико-экономически обоснованные мероприятия для снижения числа грозовых отключений.

Снижение времени определения места повреждения, а следовательно и снижение время перерыва в электроснабжении, может быть достигнуто при применении современных устройств регистрации аварийных событий.

Список литературы: 1. Правила устройства электроустановок. Издание седьмое. 2. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. 3. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых перенапряжений. 4. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. СО 153-34.21.122-2004. 5. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. СТО 56947007-29.240.044-2010.

Поступила в редколлегию 11.10.2011

М. В. БУТКО, вед. инженер, НТУ «ХПИ»; *С.М. БУТКО*, инженер, НТУ «ХПИ»; *О.Ю. ДУБИЙЧУК*, канд. техн. наук., зав. сект., НТУ «ХПИ»; *В.В. РУДАКОВ*, д-р техн. наук, главн. науч. сотр, НТУ «ХПИ»; *С.Н. СВИРИДОК*, студент, НТУ «ХПИ»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ, ВКЛЮЧАЮЩИХ СЛОИ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ПЛЕНКИ ТОЛЩИНОЙ 40 МКМ

Наведені результати ресурсних випробувань секцій високовольтних конденсаторів з поперополіпропіленової ізоляції, що просочена трансформаторним маслом в імпульсному режимі.

Results resource tests section of high-voltage capacitors with paper-insulated polypropylene, impregnated with transformer oil in a pulsed mode are presented.

Приведены результаты ресурсных испытаний секций высоковольтных конденсаторов с бумажнополипропиленовой изоляцией, пропитанных трансформаторным маслом в импульсном режиме.

Постановка задачи. Высокие удельные характеристики импульсных высоковольтных конденсаторов, достигнутые в 70-х годах прошлого столетия за счет применения в конденсаторах бумажного диэлектрика, пропитанного касторовым маслом, в настоящее время постепенно уступают характеристикам конденсаторов с комбинированным диэлектриком и чисто пленочным [1]. Это стало возможным за счет существенного уменьшения толщины изоляции d и совершенствования технологии, обеспечивающей качественную пропитку пленочной изоляции диэлектрической жидкостью без применения бумажных лент между соседними слоями пленки.

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 пленочным импульсным конденсаторам, в частности ресурсных характеристик декларируют для режимов близких к апериодическим, когда ресурс максимален. Однако опыт эксплуатации этих конденсаторов, в настоящее время все чаще вызывает нарекания у потребителей, особенно в режимах колебательного разряда, когда наблюдается выход из строя конденсаторов при ресурсах на 1-2 порядка меньших задекларированных значений, хотя по данным [2] влияние декремента колебаний не является существенным. Большое значение также имеют конструктивные факторы, влияющие на ресурс. К ним относятся толщина изоляции между обкладками [3], число слоев диэлектрика при одной и той же толщине изоляции между обкладками, толщина обкладки, применение комбинированной изоляции (из слоев различных диэлектриков). Ресурс увеличивается с уменьшением толщины изоляции d ($M \sim d^{(-2 + -3)}$), увеличением числа слоев N диэлектрика, или соответственно уменьшением толщины каждого слоя ($M \sim N$), увеличением объемной доли слоев пленки в бумажно-пленочной изоляции [4]. Увеличение объемной доли пленки, обладающей большей электрической прочностью, чем пропитанный бумажный диэлектрик но меньшим значением диэлектрической проницаемости приводит к положительному суммарному эффекту увеличения ресурса. Увеличивать толщину обкладки нецелесообразно из-за слабого эффекта увеличения ресурса и возможности полезно использовать занимаемый обкладкой объем при меньших толщинах обкладки и снижении рабочей напряженности электрического поля.

Если для чисто пленочных конденсаторов необходимо выполнить ряд жестких требований по: запрессовке в пакет при оптимальных значениях механического давления; намотке секций в предельно чистом помещении; применению специальной технологии сушки, индивидуальной пропитке конденсаторов, то для бумажно-пленочных конденсаторов требования к технологии изготовления является менее жесткими, а лучшие характеристики достигаются при увеличении процентного содержания пленки. На практике удается создать бумажнопленочные конденсаторы с содержанием пленки до 50 % объема диэлектрика [4]. Большее значение процента содержания пленки возможно лишь при существенном увеличении толщины слоя пленки по отношению к толщине листа бумаги, которые в конструкции укладываются поочередно для улучшения пропитки. Это приводит к увеличению общей толщины диэлектрика и как следствие к уменьшению ресурса. Представляет интерес определение ресурса для пленочных и бумажно-пленочных конденсаторов с высоким процентным содержанием пленки, в условиях снижения требований к технологии сушки и пропитки (существенного сокращения и упрощения цикла изготовления), когда ресурс обеспечивает только длительная электрическая прочность пленки. Такой путь создания конденсаторов возможен при необходимости быстрого их изготовления и в больших количествах в ущерб технологии при соответствующем уровне цена – качество, когда быстрое достижение ожидаемого результата является определяющим. Таким образом, представляет интерес и исследование длительной электрической прочности образцов конденсаторной изоляции с повышенным содержанием пленки (более 50%), что возможно при применении толстых слоев пленки, изготовленных по упрощенной технологии. Предварительные результаты по кратковременной электрической прочности на переменном напряжении для данного типа конструкции, пропитанной по традиционной технологии касторовым маслом изложены в работе [5].

Цель работы. Проведение поисковых исследований и определение ресурса секций импульсных высоковольтных конденсаторов с содержание пленки более 50 % объема, предназначенных для использования в составе генераторов передвижных электролабораторий для определения мест повреждения кабелей в режимах колебательного разряда.

Конструкция образцов. Для проведения эксперимента использованы конденсаторная бумага КОН-2-10, полипропиленовая пленка толщиной 40 мкм, алюминиевая фольга толщиной 9 мкм и широко распространенное трансформаторное масло Т-1500. Применение полипропиленовой пленки обусловлено возможностью использования секций в частотных режимах; а также тем, что она произволиться в Украине. Секции для испытаний выполнены цилиндрическими с выступающими обкладками на противоположных концах цилиндрической секции (рис. 1). Структура секций и последовательность укладки листов диэлектрика между обкладками представлены в таблице. Секции помотаны на полипропиленовую трубку с наружным диаметром 33 мм (рис. 1, а). Выволы выполнены из многожильного провода и вывелены с одного из торцов секции. Один вывод расположен внутри трубки и соединен с выступающей частью одной обкладки с помощью винтового соединения. Второй вывод расположен снаружи трубки и соединен с выступающей частью другой обкладки. Секция помещена в пластиковый бутыль, а выводы выведены из бутыля через горлышко (рис. 1, б).



Рисунок 1 – Образец конденсатора (*a*) и его структура (б): 1 – изоляционная оправа (Ø=25); 2 – намотанная секция; 3, 5 – выводы; 4 – винтовой зажим выводов с обкладками

Структура изоляции представлена, представленная в табл. 1, означает Б – бумага толщиной 10 мкм, П – пленка толщиной 40 мкм, а укладка листов осуществляется в поочередной последовательности. После намотки образцы \mathbb{N} 1, \mathbb{N} 2, \mathbb{N} 4, \mathbb{N} 7 залиты трансформаторным маслом в вакууме без предварительной термовакуумной обработки. Образцы \mathbb{N} 3, \mathbb{N} 5, \mathbb{N} 6 прошли полный цикл термовакуумной обработки и также залиты трансформаторным маслом в вакууме. Электрическая прочность масла в стационарном разряднике составила 70 кВ. Обкладки выполнены выступающими с противоположных сторон образцов.

гистици г	ruomidu r cipykrypu n nupumerpu nenurubucubin copusidob					
N⁰	Структура	С, нФ	Tg δ			
	образца					
1	ΠΠ	79,39	0,0002			
2	ППП	51,2	0,0002			
3	БПБ сушеный	129,8	0,0012			
4	БББББ	283,1	0,0787			
5	БПБПБ сушеный	70,37	0,0009			
6	БББББ сушеный	239,6	0,0049			
7	БПБПБ	72,6	0,011			

Таблица 1 – Структура и параметры испытываемых образцов

Методика проведения испытаний. Перед испытаниями измерены емкость С и тангенс угла диэлектрических потерь образцов tg δ (табл. 1). Выборочно определены зависимости измерения тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 2) и емкости от напряжения U (50 Гц) с помощью устройства ИПИ-10-МИ. Емкость при изменении напряжения не изменялась.



Рисунок 2 – Зависимость tg δ от U:1 – образец №1; 2 – образец №5

Значения tgδ при низких напряжениях (до 1 кВ) у чисто пленочных образцов в 4-5 раз меньше, чем у комбинированных и практически сравниваются при рабочих напряжениях (3÷4) кВ. При этом значения tgδ меньше допустимого 0.01, что является приемлемым. Резкий рост tgδ для образца №5 свидетельствует о появлении ионизационных процессов в изоляции и связан с наличием бумаги в изоляции.

Для проведения испытаний в импульсном режиме собрана реальная электрическая схем, применяемая в передвижных электролабораториях для определения мест повреждения силовых кабелей (рис. 3).



Рисунок 3 – Электрическая схема испытаний установки: ВВЧ – высоковольтный блок заряда; L – дроссель; Р – разрядник; Сх – испытываемый образец; С1 – нагрузочная емкость; L = 90 м – высоковольтный кабель ПВВЕВ-60-3.5 длинной 90 м; БУ – блок управления.

При испытаниях контролировалось зарядное напряжение на емкости Cx с помощью делителя напряжения и разрядный ток с помощью трансформатора тока и осциллографа. Нагрузочная емкость (C1 = 0,25 мкФ) обеспечивала узкий диапазон изменения частот разрядного тока при изменении емкости Cx испытываемых образцов от 50 до 300 нФ. Типичная осциллограмма тока при работе только емкости C1 представлена на рис. 4. По осциллограмме определены декремент колебаний Δ и период колебаний T = 20 мкс.

$$\Delta = I1/I2 = 1,7.$$
 (1)

Поскольку декремент колебаний меньше 2, то этот режим можно отнести к режиму слабозатухающих колебаний импульсов. Тем более, что увеличение разрядной емкости при параллельном дополнительном присоединении образца C_x будет приводить только к уменьшению декремента колебаний. Частота следования импульсов составила 0,83 Гц и контролировалась блоком управления разрядником. Ступенчатые колебания на фронте импульса вызваны волновыми процессами отражения и преломления электромагнитной волны в длинном кабеле в начальный момент его включения под напряжение. Некоторые результаты ресурсных испытаний представлены в табл. 2, где приведены значения испытательной напряженности электрического поля Е (кВ/мм), экспериментальные значения ресурса М (число импульсов), расчетное значение напряженности электрического поля [6].

$$Ep = E\sqrt[6]{M/Mp} , \qquad (2)$$

где Mp – необходимое значение ресурса, $Mp = 10^5$, и Womh – относительная удельная энергия, определяемая по соотношению для расчетного значения ресурса 10^5 импульсов

$$Wom\mu = \frac{\varepsilon_6 \cdot E_{(6)}^2}{\varepsilon_i \cdot E_{(i)}^2},\tag{3}$$

где индексы «6» и «*i*» относятся соответственно к 6 и *i*-му образцам табл. 2, є – относительная диэлектрическая проницаемость.

Образец № 4 пробился при подъеме напряжения, а кратковременная электрическая прочность образца № 6 после наработки $2 \cdot 10^4$ импульсов составила 200 кВ/мм. Значения относительной диэлектрической проницаемости ε для образцов № 3 и № 4 получены расчетным путем.



Анализ таблицы показывает, что лучшими вариантами выполнения конденсаторов при одном и том же ресурсе в режимах слабоколебательного разряда ($\Delta \le 2$) является пропитанный бумажный образец с общей толщиной диэлектрика 50 мкм и бумажно-пленочный с общей толщиной диэлектрика 110 мкм, которые имеют наибольшее значение удельной энергии. Следует заметить, что испытания образца № 6 были закончены некорректно, доведя его до пробоя разовым повышением напряжения. Поэтому ресурс образца № 6 может быть больше, что требует дальнейшей проверки и анализа.

Худшие результаты получены для чисто полипропиленовой изоляции, залитой маслом. Подобные результаты для этой изоляции получены ранее в

работе [7] для 2-х и 3-х слойных полипропиленовых образцов с толщиной пленки 12 мкм, и пропитанных по традиционной технологии.

№	Тип секции	Е, кВ/мм	М	$E_{p}, \kappa B/мм$ M = 10 ⁵	Wотн	3
1	ПП	125	10^{3}	58	0,32	2,2
2	ППП	100	$2 \cdot 10^3$	52	0,26	2,2
3	БПБПБ	123	$2,4 \cdot 10^4$	90	0,88	2,5
4	БПБ	125	$1,7 \cdot 10^{3}$	63	0,444	2,59
5	БББББ	40	1			4,0
6	БББББ	100	$2\cdot 10^4$	76	1	4,0
		200	1			

Таблица 2 – Результаты испытаний

Выводы.

1. Результаты пробных испытаний на ресурс показывают, что возможно создание бумажно-пропиленовых конденсаторов с большим содержанием (более 70 %) пленки, изготовленных по упрощенной технологии и имеющих такую же удельную энергию, как бумажно-масляные конденсаторы традиционного исполнения.

2. Необходимо проведение дополнительных исследований по уточнению результатов пробных испытаний.

3. Поскольку частота следования импульсов в реальной установке небольшая, то целесообразно рассмотреть возможность использования в конденсаторах полярного пленочного диэлектрика.

Список литературы: 1. Ермилов И.В. Высоковольтные импульсные конденсаторы с полимерной изоляцией // Электричество. – 2009. – № 9. – С. 73-79. 2. Гребенников И.Ю., Гуноко В.И., Дмитришин А.Я. и др. Исследования зависимости ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком от режима эксплуатации // Электротехника. – 2006. – № 6. – С. 38-41. 3. Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю. Сравнительный анализ показателей надежности высоковольтных конденсаторов // Вестник НТУ «ХПИ». – № 42. – 2005. – С. 104-109. 4. Кучинский Г.С., Шкуропат П.И., Шнеерсон Г.А. Генераторы больших импульсных токов // Сб. ст. – под ред. Велихова М. – «Физика и техника мощных импульсных систем». – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с. 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». – № 16. – 2011. – С. 35-39. 6. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1979. – 224 с. 7. Рудаков В.В., Кравченко В.В., Кравченко И.Р. – № 16. – 2011. – С. 35-39. 6. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1979. – 224 с. 7. Рудаков В.В., Кравченко Ю. В. Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной нефтяным маслом, в импульсные емика // Вісник НТУ «ХПІ». – Харьков изоляции, пропитанной нефтяным маслом, в импульсные изоляции // Вестник НТУ «ХПІ». – Х 16. – 2011. – С. 35-39. С. Учинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1979. – 224 с. 7. Рудаков В.В., Кравченко И. В. Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной нефтяным маслом, в импульсные вехиме // Вісник НТУ «ХПІ». «Техніка і електрофізика високих напруг». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – № 20. – С. 167-174.

Поступила в редколлегию 07.10.2011

А.Я.ДМИТРИШИН, мл. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СЕКЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО КОМПЛЕКСА С ПОМОЩЬЮ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

На основі розрахунку електричного поля на краю обкладки секції конденсатора методом конформних відображень видано рекомендації щодо конструкції діелектричної системи високовольтного імпульсного конденсатора для заглибного електророзрядного комплексу.

Recommendations about construction of dielectric system of high-voltage pulse capacitor for downhole electrodischarge complex on base of calculation of electrical field by method of conformal displays are given.

На основе расчета электрического поля на краю обкладки секции конденсатора методом конформных отображений выданы рекомендации относительно конструкции диэлектрической системы высоковольтного импульсного конденсатора для погружного электроразрядного комплекса.

Введение. Как показали исследования в работе [1], дальнейшее повышение энергоемкости высоковольтных импульсных конденсаторов для погружных электроразрядных комплексов, применяемых для интенсификации добычи полезных ископаемых, возможно за счет применения в качестве рабочего диэлектрика секции конденсатора диэлектрических систем на основе полимерных пленок, пропитанных низковязкой диэлектрической жидкостью.

Применение новых диэлектрических систем требует многосторонних исследований, однако основным фактором, определяющим допустимую рабочую напряженность электрического поля, а, следовательно, удельные энергетические характеристики конденсатора, является электрическое поле в секции конденсатора.

Как указано в работе [2], основной причиной выхода из строя конденсатора является электрический пробой на краю обкладок секции. Как показали исследования [3], в высоковольтных импульсных конденсаторах для погружных электроразрядных комплексов наиболее слабым компонентом диэлектрической системы изоляции секции является пропитывающая жидкость, электрическая прочность которой снижается из-за применения в качестве компенсатора температурного расширения элегаза (SF₆).

Цель данной работы – определение коэффициента усиления электрического поля и областей повышенной напряженности в пропитывающем диэлектрике на краю обкладок секции, что позволит выбрать оптимальную конструкцию диэлектрической системы на основе полимерных пленок для создания высоковольтного импульсного конденсатора с повышенными удельными энергетическими характеристиками.

В процессе изготовления секции конденсатора слои жидкости и пленки принимают положение, показанное на рис. 1.

Для расчета электрического поля в секции конденсатора можно применить модель секции со сдвинутыми обкладками (рис. 2), предложенную в работе [4] и решенную методом конформных отображений.



Рисунок 1 – Расположение слоев пленки и пропитывающей жидкости на краю обкладок секции конденсатора: 1 – обкладки секции; 2 – пропитывающая жидкость; 3 – пленочный диэлектрик первого типа; 4 – пленочный диэлектрик второго типа



Рисунок 2 – Расчетная модель края секции конденсатора со сдвинутыми обкладками

Для однородного диэлектрика коэффициент усиления электрического поля K_{yo} на расстоянии r от острого края обкладки может быть вычислен по формуле [4]:

$$K_{yo} = \sqrt[3]{\frac{d}{\pi \cdot a_n \cdot k_T}} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{r}}, \qquad (1)$$

где d – толщина диэлектрика; k_T – поправочный коэффициент [4], k_T = 1,5; a_n – геометрический коэффициент;

$$a_n = \sqrt{1 - (1/(1 + \frac{1}{2} \cdot n))^2} , \qquad (2)$$

где *n* – отношение толщины обкладки *d*_{об} к толщине диэлектрика *d*.

Для неоднородного диэлектрика можно записать:

$$K_{v} = K_{vo} \cdot K_{H\partial}, \tag{3}$$

где K_y – коэффициент усиления поля в неоднородном диэлектрике; K_{no} – коэффициент неоднородности диэлектрика.

Как показали исследования, проведенные в ИИПТ НАН Украины, наиболее оптимальной конструкцией пленочной диэлектрической системы является система на основе трех слоев пленки.

Коэффициент неоднородности трехслойного пленочного диэлектрика можно определить по формуле:

$$K_{\mu\sigma} = \left[\frac{d_{\mathcal{H}}}{d} + \frac{\varepsilon_{\mathcal{H}}}{\varepsilon_{nn1}} \cdot \frac{d_{nn1}}{d} + \frac{\varepsilon_{\mathcal{H}}}{\varepsilon_{nn2}} \cdot \frac{d_{nn2}}{d}\right]^{-1},\tag{4}$$

где d_{∞} , d_{nnl} , d_{nn2} – суммарные толщины слоев жидкости, первой пленки, второй пленки, соответственно; ε_{∞} , ε_{nnl} , ε_{nn2} – относительные диэлектрические проницаемости слоев жидкости, первой пленки, второй пленки, соответственно.

Для использования в конструкции секции высоковольтного импульсного конденсатора скважинных устройств на основании данных работы [5] были предложены следующие диэлектрические системы:

- полиэтилентерефталатная, состоящая из трех слоев пленки ПЭТ-КЭ (ε = 3,2), толщиной d = 40 мкм;
- комбинированная полипропиленово-полиэтилентерефталатная, состоящая из двух слоев пленки ПП-КСШ (ε = 2,2) и одного слоя пленки ПЭТ-КЭ (ε = 3,2), толщиной d = 39 мкм.

В качестве пропитывающих жидкостей были выбраны трансформаторное масло T-1500 ($\varepsilon = 2,2$) и полиметилсилоксановая жидкость ПМС-20($\varepsilon = 2,6$).

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента усиления электрического поля в жидком диэлектрике от расстояния *r* до острого края обкладки для каждой из выбранных систем.

Используя формулы (1)-(4), можно также определить расстояние $r_{\rm H}$, на котором коэффициент усиления поля в неоднородном диэлектрике $K_{yho} = 2$, что соответствует границе резко неоднородного поля.

Анализируя приведенные зависимости, можно отметить, что в случае применения комбинированной изоляции при пропитке обеими жидкостями коэффициент усиления поля и область повышенной напряженности меньше, чем при применении изоляции на основе одной пленки. Так, для пропитки трансформаторным маслом при применении комбинированной изоляции $r_{\rm H} = 2$ мкм, а при применении одной пленки – $r_{\rm H} = 3$ мкм. При пропитке полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-20 при применении комбинированной изоляции голяции $r_{\rm H} = 1,2$ мкм, а при применении одной пленки – $r_{\rm H} = 2$ мкм. Следованной



тельно, использование комбинированной пленочной системы улучшает приэлектродные условия на краю обкладки секции конденсатора.

Рисунок 3 – Зависимости коэффициента усиления электрического поля в жидком диэлектрике от расстояния до острого края обкладки для пленочных диэлектрических систем: *а* – полиэтилентерефталатная система, пропитанная трансформаторным маслом T-1500; *б* – комбинированная полипропиленово-полиэтилентерефталатная система, пропитанная трансформаторным маслом T-1500; *в* – полиэтилентерефталатная система, пропитанная полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-20; *г* – комбинированная полипропиленово-полиэтилентерефталатная система, пропитанная полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-20

Что касается выбора пропитывающей жидкости, то при применении полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 коэффициент усиления электрического поля ниже, чем при использовании трансформаторного масла, т.е. использование жидкого диэлектрика с большей диэлектрической проницаемостью уменьшает неоднородность электрического поля.

Учитывая вышесказанное, можно сделать **вывод**, что с точки зрения расчета электрического поля наиболее оптимальной диэлектрической системой для изоляции секции высоковольтного импульсного конденсатора для погружного электроразрядного комплекса является комбинированная полипропиленово-полиэтилентерефталатная система, пропитанная полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-20.

Список литературы: 1. Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Швец И.С. Оценка достигнутого уровня и перспективы создания высоковольтных импульсных конденсаторов погружных электроразрядных комплексов // Электротехника. – 2007. – № 8. – С. 48-51. **2.** Рудаков В.В. Распределение электрического поля у края обкладки конденсатора с комбинированным диэлектриком // Вестник ХГПУ. – 1998. – Вып. 25. – С. 12-16. **3.** Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Топоров С.О. Исследование влияния электрически прочных газов на электрофизические характеристики жидких диэлектриков // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XIII Международной школысеминара (21-25 августа 2007). – Николаев: КП «Николаевская областная типография», 2007. – С. 164-166. **4.** *Титов М.Н.* Расчет электрического поля на краю секции конденсатора // Электричество. – 1979. – № 11. – С. 56-58. **5.** Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Михайлов И.Г., Онищенко Л.И., Фещук Т.А. Исследование зависимости ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком от режимов эксплуатации // Электротехника. – 2006. – № 6. – С. 38-41.

Поступила в редколлегию 24.10.2011

УДК 681.3.07

I.С.ДОРОХІН, аспірант, НТУ «ХПІ»; *В.М.ПОШТАРЕНКО*, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПІ»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ПРОДУКТИВНОСТІ VOIP ДОДАТКІВ НА ОСНОВІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

В роботі порівнюється продуктивність додатка передачі голосу згідно з протоколом IP (VoIP) між MPLS-мережею і звичайною IP-мережею. Порівняння зроблено на основі показників продуктивності, таких як: голосова пакетна затримка з кінця в кінець, варіація затримки голосу, кількість відправлених голосових пакетів і отриманих.

In this paper the performance of voice applications via IP (VoIP) is compared between the MPLSnetwork and the conventional IP-network. A comparison is made on the basis of performance indicators, such as voice packet delay from end to end, the variation in delay votes, the number of voice packets sent and received

В работе сравнивается производительность приложения по передаче голоса по протоколу IP (VoIP) между MPLS-сетью и обычной IP-сетью. Сравнение сделано на основе показателей производительности, таких как: голосовая пакетная задержка с конца в конец, вариация задержки голоса, количество отправленных голосовых пакетов, и полученных.

В даний час Інтернет відіграє значну роль в житті більшості людей через широке розмаїття програм і сервісів, що надаються мережею. Зростаюча з

кожним роком кількість користувачів Internety зробила популярними сервіси телебачення і телефонії для використання мережі як середовища залучення клієнтів. Ці послуги надаються за рахунок конвергенції голосу та даних по одній мережевій інфраструктурі. Реалізація програм реального часу в Інтернеті є складним завданням для звичайних IP-мереж, тому що вони використовують best-effort-служби, які не надають гарантії обслуговування і управління трафіком (TE). Крім того, IP-мережі пропонують мінімальну передбачуваність послуг, що є неприйнятним для таких додатків як, телефонія, мультимедійні послуги.

Досить важко реалізувати додатки в реальному часі, такі як VoIP в традиційних мережах IP. IP в основному працює з наданням послуг best-effort, які не гарантують якість сервісу. Проведений аналіз [1-8] дозволив сформулювати наступні перешкоди IP-мережі для реалізації VoIP-додатків:

- 1. Маршрутизація в IP розроблена для обчислення найкоротшого шляху до призначення, а не найкращого.
- 2. Більшість каналів в IP-мережах або недовантажені, або перевантажені через процес маршрутизації. В результаті цього утворюється черга в каналі.
- 3. ІР-мережі не масштабовані і ТЕ важко реалізувати в ІР-мережах.

Існує багато чинників, які впливають на якості голосу: вибір кодека, втрата пакетів, джиттер, затримки і так далі Для VoIP затримки не повинні перевищувати 150 ms, для того, щоб якість зв'язку була прийнятною. Затримки пакетів можна розділити на 3 групи:

- 1. Шифрування, компресія і пакетизація при відправленні. У кодеку G711 затримки шифрування і пакетизації складають 1 і 20 ms відповідно.
- 2. Буферизація, декомпресія, депакетизація і відтворення. Апроксимуючи ці затримки виходить 45 ms.
- Також це затримки при передачі даних безпосередньо в мережі, пов'язані з побудовою черги пакетів, передачі їх і так далі Вони складають не більше 80 ms.

Таким чином, затримки в мережі від відправника до одержувача не повинні перевищувати більш ніж 80 ms для відповідної якості зв'язку. Необхідна пропускна спроможність для VoIP-64 к/бит.

Додатки VoIP вимогливі до якості обслуговування з мінімальними затримками і низькою втратою пакетів. Цього можна досягти завдяки MPLSмережам. У мережах MPLS пакети передаються на Label Switched Path(LSP). LSP встановлює обмеження на пропускну спроможність, поліси адміністрації. Ці шляхи є віртуальними з'єднаннями для надійної передачі пакетів. Це бажано для передачі трафіку VoIP.

VoIP, також відома як IP телефонія, передавалася за допомогою протоколу RTP. RTP складається з даних і частини, що управляє. Частина, що управляє, – протокол RTCP. VoIP здійснюється шляхом використання комбінацій таких протоколів, як RTP/UDP/IP. Хоча надійний протокол TCP/IP не використовується для реалізації подібних застосувань з – за того, що його використання може привести до затримок, а голосові і відео додатка чутливі до затримок. RTP і UDP використовується для передачі даних застосувань, а RTCP для моніторингу.

Незважаючи на актуальність проблеми, до теперішнього часу немає чітко визначеного математичного апарату [9], який би здійснював оптимізацію мереж за допомогою ТЕ. 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.

Метою статті є порівняння та аналіз показників продуктивності якості обслуговування імітаційних моделей мереж ІР та MPLS/TE, що виконують передачу додатка голосу згідно з протоколом ІР (VoIP).

Імітаційну модель доцільно дослідити та проаналізувати за допомогою наступної топології мережі (рис. 1), яка реалізується у середовищі Opnet Modeler 14.5. Трафік VoIP посилається з джерела (VoIP_WEST) до приймача (VoIP_EAST) в двох мережах (MPLS і традиційних мережах IP). Підхід заснований на оцінці приблизного мінімуму числа дзвінків, які можуть обслуговуватися в мережах IP і MPLS. Для оцінки приблизного мінімуму дзвінків в кожній мережі використовується затримка із кінця в кінець.

Симуляція складається з двох сценаріїв з однаковою топологією мережі: сценарій 1 заснований на MPLS-мережі з ТЕ; сценарій 2 заснований на IPмережі без ТЕ.



Рисунок 1 - Топологія мережі MPLS

ТЕ в моделі реалізується за допомогою використання CR-LDP сигнального протоколу, який набудовується в OPNET за допомогою встановлення FEC в конфігурації налаштувань MPLS, а також виставлянням параметрів LDP на маршрутизаторах. Коли в мережі відбувається черга, трафік, направлений по шляху CR-LSP, рівномірно розподіляється по мережі MPLS. Це зменшує черги в мережі і покращує ефективність утилізації ресурсів в мережі. Дзвінки VOIP встановлюються за допомогою налаштування атрибутів додатка і профілю.

V MPLS моделі мережі (рис. 1) існує лва шляхи: Ingress R1 \leftrightarrow MPLS R2 \leftrightarrow Egress R4 i Ingress R1↔MPLS R3↔Egress R4. Обидва шляхи рівновіддалені від джерела до приймача. Коли пакети маршрутизуються, мережа ІР використовує лише один із шляхів і не використовує інший шлях, оскільки вони є найкоротшими. З того часу, як ТЕ став застосовуватися в мережах MPLS, завантаження мережі рівномірне розподіляється, що робить MPLS ефективною технологією. У моделі мережі IP визначено два шляхи: IP R1 \leftrightarrow IP R2 \leftrightarrow IP R4 i IP R1 \leftrightarrow IP R3 \leftrightarrow IP R4. Модель IP-мережі без TE: MPLS-маршрутизатори замінені на звичайні маршрутизатори і пакети IP маршрутизуються за допомогою протоколу OSPF (який не враховує характеристики мережі). Трафік VoIP передається між VoIP West i VoIP East. Процес встановлення дзвінків VoIP аналогічний сценарію з MPLS.

Для того, щоб створити додаток в моделі в середовищі OPNET, необхідно використовувати об'єкт під назвою application definition attribute. Властивості цього об'єкту складаються з певних застосувань, які можуть набудовуватися залежно від вимог користувачів. Такими застосуваннями є HTTP, E-mail, Video, FTP, Voice, Database.

Три додатка (FTP, Video i VoIP) налагоджені в даній моделі за допомогою властивостей об'єкту Applications. FTP і Video-додаток задані як фоновий трафік в моделі. Додаток Voice налагоджений шляхом конфігурації властивостей вкладки Voice Table. Додаток VoIP використовує шифратор G.711 і Interactive Voice як тип сервісу для встановлення дзвінків VoIP.

Визначений початковий час симуляції моделі, який дорівнює 100 (offset '60' + start time '40') секундам, і додаток VoIP, який повторюється безперервно до кінця симуляції. Дані налаштування означають, що дзвінки VoIP, встановлені між станціями VoIP_West i VoIP_East, починаються зі 100 секунд і продовжуються безперервно до кінця симуляції моделі.

Перший дзвінок VoIP починається з сотої секунди симуляції і через кожні 2 секунди дзвінок VoIP додається в мережу. Такий підхід дозволяє визначити, яку кількість дзвінків може обслуговувати така мережа.

Результатами моделювання є відображення однаково заданих параметрів виміру якості передачі трафіку VoIP в мережах MPLS і IP.

Рис. 2 демонструє середню кількість відправлених і отриманих пакетів в мережах MPLS і IP. Синій графік демонструє середню кількість отриманих пакетів для мережі IP. Червоний-для мережі MPLS. Зелений графік показує середню кількість відправлений пакетів. Результати оцінки симуляції моделювання показують, що модель мережі MPLS з TE дає кращу продуктивність, в порівнянні з моделлю IP-мережі.



Рисунок 2 - Відправлені та отримані голосові пакети

Втрата пакетів в мережі IP на 240 секунді відповідає тому, що дзвінки VoIP після 240-ї секунди не можуть встановлюватися з прийнятною якістю. Втрата пакетів в дзвінках VoIP після 240-ї секунди наводить до часткової втрати інформації, внаслідок чого відбувається спотворення голосу і переривання зв'язку.

Втрата пакетів в мережі MPLS відбувається з 300-ї секунди. Мережа MPLS передає пакет з високою швидкістю і низькими затримками. ТЕ, реалізований в мережі MPLS, дозволяє тимчасово скоротити черги в мережі. Враховуючи всі ці чинники, можна сказати, що мережа MPLS з ТЕ забезпечує кращу продуктивність в порівнянні з мережею IP.

Рис. З відображає джиттер голосового пакету в мережах MPLS і IP. Аналізуючи отримані результати, бачимо, що в мережі IP джиттер голосового пакету починає зростати з 240-ї секунди. У мережі MPLS з ТЕ джиттер голосового пакету починає зростати з 300-ї секунди. Це означає, що в даний момент часу починає відбуватися втрата голосових пакетів, вказаних на рис. 1.

Кожен новий дзвінок відбувається в мережі через кожні 2 секунди, а початок дзвінків починається з 100-ї секунди симуляції моделі і триває до кінця симуляції (420-а секунда).

Для кожного сценарію загальна кількість дзвінків може бути обчислена таким чином:

(420 – 100)/2 = 160 дзвінків VOIP.

Далі, оперуючи отриманими результатами, можна обчислити кількість дзвінків, що обслуговується з необхідними параметрами якості.

Для IP-мережі на 240-ій секунді затримка «з кінця в кінець» перевищує 80 ms, що наводить до погіршення якості зв'язку. Таким чином, дзвінки V0IP з необхідною якістю відбуваються в проміжку зі 100 секунди по 240 секунду.



Рисунок 3 – Джиттер голосового пакету

Тоді кількість дзвінків VoIP, що обслуговується мережею IP із заданою якістю сигналу, можна обчислити таким чином:

(240 - 100)/2 = 70 дзвінків VoIP з необхідною якістю.

Аналогічно для мережі MPLS затримка «з кінця в кінець» перевищує 80 ms близько 300-ої секунди. Тоді кількість дзвінків VoIP, що обслуговується мережею MPLS із заданою якістю сигналу, можна обчислити таким чином:

(300 - 100)/2 = 100 дзвінків VoIP з необхідною якістю.

Висновки. На основі результатів моделювання можна зробити висновок про те, що MPLS забезпечує краще рішення в реалізації програм VoIP (Інтернет-телефонії) в порівнянні зі звичайними ІР-мережами тому що:

- 1. Маршрутизатори в MPLS використовують менше часу на обробку в пересиланні пакетів. Це більше підходить для таких додатків, як VoIP, які володіють меншою толерантністю до затримок.
- 2. Впровадження MPLS ТЕ мінімізує черги в мережі. ТЕ в MPLS реалізується за допомогою протоколів сигналізації, наприклад CR-LDP і RSVP.
- MPLS випробовує мінімальні затримки і забезпечує високу пропускну здатність у порівнянні зі звичайними ІР-мережами.

Список літератури: 1. Гольдишейн А.Б., Гольдишейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 304 с. 2. Simha A., Osborne E. Traffic Engineering with MPLS. – Сізсо Press, 2002. – 608 р. 3. Вегенша III. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с. 4. Ahuja, R.K., Magnanti, T.L., Orlin J.B. Network Flows: Theory, Algorithms and Applications. – Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993. 5. Christofides, N. Graph Theoriy- An Algorithmic Approach. – New York: Academic Press, 1975. 6. Haßlinger, G., Schnitter, S. Optimized Traffic Load Distribution in MPLS Networks // Telecommunications Network Design and Management. - Kluwer Akad. Publ. (2002). - S. 125-141. 7. Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Динамическое управление ресурсами ТКС: математические модели в пространстве состояний // Наукові записки УНДІЗ. – 2009. – № 1 (9). – С. 3-26. 8. Ложковский А.Г., Ганифаев Р.А. Оценка параметров качества обслуживания самоподобного трафика энтропийным методом // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. – № 1. – С. 57-62. 9. Д. Амduche, A. Chiu, A. Elwalid, I. Widjaja, X. Xiao, Overview and Principles of Internet Traffic Engineering // Internet informational RFC 3272. - Мау 2002. 10. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Искусство оптимизации трафика // Журнал сетевых решений LAN. – № 12. – 2001. 11. Бакланов И.Г. NGN: Принципы построения и реализации. – М: Эко-Трендз, 2008. 12. Семенов Ю.А. Телекоммуникационные технологии // Интернет-университет информационных технологий. Ресурс http://book.itep.ru/. 13. D. Awduche, J. Malcolm, J. Agogbua, M. O'Dell, J. McManus Requirements for traffic engineering over MPLS // RFC 2702, September 1999. 14. D. Awduche, A. Chiu, A. Elwalid, I. Widiaia, X. Xiao Overview and Principles of Internet Traffic Engineering // Internet informational RFC 3272. - May 2002. 15. Ю.П.Зайченко, Ахмед А.М.Шарадка Анализ и оптимизация характеристик сетей MPLS по заданным показателям качества УДК 681.324. 16. Будылдина Н. В., Коновалов П. А. Разработка программного обеспечения для оптимизации мультисервисных сетей. – Открытое образование, июнь 2006. 17. Зайшев Л.А., Шинкарчук Т.Н. Моделирование телекоммуникационных сетей в системе NS УДК 621.39 004.7 // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2006. - № 2. 18, Дорохін І.С., Поштаренко В. М. Оптимізація транспортних мереж NGN на основі технології NGSDH // XVIII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». - Харків, 2010.

Надійшла до редколегії 27.10.2011

УДК 621.315

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

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

ТАНГЕНС УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ МНОГО-СЛОЙНЫХ СШИТЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

На основі математичної моделі стаціонарного електричного поля в багатошаровому неідеальному діелектрику визначений тангенс кута діелектричних втрат у багатошарових зшитих (вулканізованих) конструкціях силових кабелів і проводів.

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 detected. На основе математической модели стационарного электрического поля в многослойном неидеальном диэлектрике определен тангенс угла диэлектрических потерь в многослойных сшитых (вулканизованных) конструкциях силовых кабелей и проводов.

Анализ публикаций. Задачи о распределении электрического поля в многослойном диэлектрике имеют важные практические приложения, прежде всего, при разработке многослойных конструкций сердечников кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена [1, 2]. В [3] решение дано для осесимметричной коаксиальной модели без учета активной проводимости в слоях. Решение нестационарной задачи для плоского конденсатора с двухслойным неидеальным диэлектриком приведено в [4]. Однако, ни одна из приведенных работ не позволяет получить решение задачи для многослойного неидеального диэлектрика, расположенного между коаксиальными проводящими цилиндрами, к которым приложено переменное напряжение низкой частоты для случая, когда электромагнитный процесс является стационарным, то есть в том случае, когда закончились все переходные процессы.

Постановка задачи. Воздействие переменного электрического поля на реальны диэлектрик помимо чисто реактивного тока, вызывает в нем и дополнительные токи, которые зависят от качества диэлектрика. К ним относятся:

- сквозной ток проводимости или ток утечки, обусловленный чисто активной проводимостью диэлектрика;
- ток и, соответственно, потери, обусловленные поляризацией молекул под действием переменного поля;
- адсорбционный ток, возникающий вследствие имеющихся микронеоднородностей структуры диэлектрика;
- эквивалентный ток, связанный с ионизационными потерями в газовых включениях различной формы.

Последние два тока очень слабо влияют на распределение напряженности поля в толще диэлектрика и при решении данной задачи ими можно пренебречь. Потери, обусловленные поляризацией молекул диэлектрика, теоретически учесть очень сложно; мы не будем их здесь учитывать, и ограничимся только током сквозной проводимости, вносящим основной вклад в общую картину процесса воздействия переменного электрического поля на кусочнооднородный несовершенный диэлектрик. Таким образом в такой постановке задача дает нижний предел для тангенса угла диэлектрических потерь.

Будем считать, что диэлектрик состоит из *n* кусочно-однородных областей $\Omega_1, \Omega_2, ..., \Omega_i, ..., \Omega_n$ ограниченных, соответственно, коаксиальными цилиндрами, имеющими радиусы $r_0 - r_1, r_1 - r_2, ..., r_{i-1} - r_i, ..., r_{n-1} - r_n$. Пусть в каждой области Ω_i однородный диэлектрик характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью ε_i и удельной электропроводностью γ_i , а идеально проводящие электроды для возбуждения поля в диэлектрике имеют радиусы r_0 и r_n .

Система двух коаксиально расположенных цилиндров, между которыми находится многослойный неидеальный диэлектрик, представляет собой электрический конденсатор с *п*-слойной изоляцией. В силу того, что напряженность электрического поля не зависит от азимутального угла, потенциал на каждой из окружностей, имеющих радиус $r_0, r_1, r_2, ..., r_n$ будет величиной постоянной. Это позволяет представить конденсатор с *n*-слойным диэлектриком в виде соединенных последовательно *п* конденсаторов, в каждом из которых его диэлектрик является однородным. В свою очередь в каждом элементарном конденсаторе несовершенный диэлектрик можно заменить последовательной или параллельной схемой замещения. Векторные диаграммы токов и напряжений для этих двух случаев приведены на рис. 1 и 2. Они наглядно показывают, что углы диэлектрических потерь $\delta_1, \delta_2, ..., \delta_n$ слоев диэлектрика отличаются друг от друга и от общего угла потерь б всего диэлектрика. Для того, чтобы в общем случае определить тангенс общего угла δ потерь всего диэлектрика необходимо вычислить активную I_a и реактивную I_p компоненты полного тока $\dot{I} = I_a + I_n$, протекающего через одну из обкладок этого конденсатора [5].

Тангенс угла потерь в общем случае цилиндрического *n*-слойного неидеального диэлектрика. Выбрав для определенности внешнюю обкладку и учитывая закон Ома в дифференциальной форме для комплексных величин

$$\dot{J}(r) = \dot{Y}(r)\dot{E}(r) \tag{1}$$

имеем

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

где, $\dot{E}(r_n)$, $\dot{J}(r_n)$ – 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.

Тогда, с учетом $\dot{E}(r)$ выражение для комплексного вектора полного тока \dot{I} , протекающего через конденсатор, имеет вид

$$\dot{I} = \frac{2\pi U}{\frac{1}{\dot{Y}_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\dot{Y}_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \dots + \frac{1}{\dot{Y}_n} \ln \frac{r_n}{r_{n-1}}}.$$
(3)

С другой стороны для конденсатора, образованного всем диэлектриком, справедливо соотношение

$$\dot{I} = \dot{Y}\dot{U}$$
, (4)

где, У – общая комплексная проводимость всего диэлектрика.

Сравнивая теперь между (3) и (4) получаем выражение для общей ком-

плексной проводимости Ý для всего диэлектрика из n слоев

$$\dot{Y} = \frac{2\pi}{\frac{1}{\dot{Y}_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\dot{Y}_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \dots + \frac{1}{\dot{Y}_n} \ln \frac{r_n}{r_{n-1}}}.$$
(5)

Активная I_a и реактивная I_p , составляющие полного тока I, будут равны, соответственно, действительной и мнимой частям комплексного выражения для полного тока \dot{I} .

$$I_a = \operatorname{Re}\{I\}; \tag{6}$$

$$I_p = \operatorname{Im}\{\dot{I}\},\tag{7}$$

а тангенс общего угла δ потерь всего диэлектрика теперь можно найти как обычно

$$tg\delta = I_a/I_p . ag{8}$$



Рисунок 1 – Векторная диаграмма токов и напряжений для последовательной схемы замещения п-слойного неидеального диэлектрика

Из (5) ... (8) видно, что полученное выражение для тангенса общего угла диэлектрических потерь, с одной стороны, учитывает диэлектрические проницаемости $\varepsilon_1, \varepsilon_2, ..., \varepsilon_n$ и активные проводимости $\gamma_1, \gamma_2, ..., \gamma_n$ в каждом слое, то есть свойства реальных применяемых материалов. С другой стороны, особенности взаимного коаксиального расположения слоев учтены набором коэффициентов $\ln(r_1/r_0), \ln(r_2/r_1), ..., \ln(r_n/r_{n-1})$ характерных для цилиндрической геометрии.



Рисунок 2 – Векторная диаграмма токов и напряжений для параллельной схемы схемы замещения п-слойного неидеального диэлектрика

Далее, как видно из (5), в общем случае проводимость \dot{Y} диэлектрика с n слоями между двумя металлическими электродами радиусов r_0 и r_1 может быть представлена в виде

$$\dot{Y} = \frac{\prod_{k=1}^{n} \dot{Y}_{k}}{\dot{\beta}}, \qquad (9)$$

где

$$\dot{\beta} = \prod_{m=1}^{n} \dot{Y}_m \sum_{k=1}^{n} \dot{Y}_k^{-1} \alpha_k ; \qquad (10)$$

$$\alpha_k = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_k}{r_{k-1}},\tag{11}$$

k = 1, 2, ..., n; m = 1, 2, ..., n.Здесь значком \prod обозначены произведения проводимостей \dot{Y}_k или \dot{Y}_m в слоях, номерам которых соответствуют значения индексов k = 1, 2, ..., n и m = 1, 2, ..., n.

Чтобы избавиться от комплексного числа в знаменателе выражения для

 \dot{I} , представим последнее в виде

$$\dot{I} = \frac{\dot{U} \prod_{k=1}^{n} \dot{Y}_{k} \dot{\beta}^{*}}{\dot{\beta} \dot{\beta}^{*}} .$$
(12)

Звездочка означает комплексное сопряжение чисел $\dot{\beta}$ и $\dot{\beta}^*$.

Без ограничения общности фазу комплексного вектора \dot{U} всегда можно положить равной нулю. Тогда, учитывая (6) – (12) и то, что знаменатель (12) как произведение двух комплексно сопряженных чисел всегда будет числом действительным, можно сразу записать общее выражение для тангенса угла потерь δ всего *n*-слойного диэлектрика.

$$tg\delta = \frac{I_a}{I_p} = \frac{R_e \left\{ \prod_{k=1}^n \dot{Y}_k \dot{\beta}^* \right\}}{I_m \left\{ \prod_{k=1}^n \dot{Y}_k \dot{\beta}^* \right\}},$$
(13)

поскольку справедливы соотношения

(

$$I_{a} = R_{e} \left\{ \frac{2\pi \dot{U} \prod_{k=1}^{n} \dot{Y}_{k} \dot{\beta}^{*}}{\dot{\beta} \dot{\beta}^{*}} \right\} = \frac{U}{\dot{\beta} \dot{\beta}^{*}} R_{e} \left\{ \prod_{k=1}^{n} \dot{Y}_{k} \dot{\beta}^{*} \right\};$$
(14)

$$I_{p} = \left\{ \frac{2\pi U \prod_{k=1}^{n} \dot{Y}_{k} \dot{\beta}^{*}}{\dot{\beta} \dot{\beta}^{*}} \right\} = \frac{U}{\dot{\beta} \dot{\beta}^{*}} I_{m} \left\{ \prod_{k=1}^{n} \dot{Y}_{k} \dot{\beta}^{*} \right\}.$$
(15)

Для того, чтобы оценить правильность решения поставленной здесь задачи проведем сравнение полученного результата с имеющимся в известной литературе. В [6] приводится решение такой задачи для частного случая определения тангенса угла потерь двух последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_2 , которые имеют утечку, то есть для случая, когда их диэлектрик в слоях является несовершенным. Таким образом, полученное выше общее решение (13) необходимо записать для случая двухслойного диэлектрика.

Следуя этому, с учетом того, что $\dot{Y} = \gamma + i\omega\varepsilon$ и n = 2, из (9) – (11) имеем с учетом (7)

$$\dot{Y} = \frac{\dot{Y}_{1}\dot{Y}_{2}}{\dot{\beta}} = \frac{2\pi\dot{Y}_{1}\dot{Y}_{2}}{\dot{Y}_{1}\dot{Y}_{2}\left(\frac{1}{\dot{Y}_{1}}\ln\frac{r_{1}}{r_{0}} + \frac{1}{\dot{Y}_{2}}\ln\frac{r_{2}}{r_{1}}\right)} = \frac{2\pi\dot{Y}_{1}\dot{Y}_{2}}{\dot{Y}_{2}\ln\frac{r_{1}}{r_{0}} + \dot{Y}_{1}\ln\frac{r_{2}}{r_{1}}} .$$
(16)

С учетом конкретных значений \dot{Y}_1 и \dot{Y}_2 имеем

$$\dot{Y} = \frac{(\gamma_1 + i\omega\varepsilon_1)(\gamma_2 + i\omega\varepsilon_2)}{\alpha_1(\gamma_2 + i\omega\varepsilon_2) + \alpha_2(\gamma_1 + i\omega\varepsilon_1)},$$
(17)

здесь

$$\dot{\beta}^{*} = \{\alpha_{1}\gamma_{2} + i\omega\varepsilon_{2}\alpha_{1} + \alpha_{2}\gamma_{1} + i\omega\varepsilon_{1}\alpha_{2}\}^{*} = \\ = \{(\alpha_{1}\gamma_{2} + \alpha_{2}\gamma_{1}) + i\omega(\varepsilon_{1}\alpha_{2} + \varepsilon_{2}\alpha_{1})\}^{*} = \\ = (\alpha_{1}\gamma_{2} + \alpha_{2}\gamma_{1}) - i\omega(\varepsilon_{1}\alpha_{2} + \varepsilon_{2}\alpha_{1});$$
(18)

$$\dot{Y}_{1}\dot{Y}_{2} = (\gamma_{1} + i\omega\varepsilon_{1})(\gamma_{2} + i\omega\varepsilon_{2}) = [(\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2}) + i\omega(\varepsilon_{1}\gamma_{2} + \varepsilon_{2}\gamma_{1})]; \quad (19)$$

$$\dot{Y}_{1}\dot{Y}_{2}\dot{\beta}^{*} = [(\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2}) + i\omega(\varepsilon_{1}\gamma_{2} + \varepsilon_{2}\gamma_{1})][(\alpha_{1}\gamma_{2} + \alpha_{2}\gamma_{1}) - i\omega(\varepsilon_{1}\alpha_{2} + \varepsilon_{2}\alpha_{1})] = \\ = [(\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2}) + i\omega(\gamma_{1}\alpha_{2} + \gamma_{2}\alpha_{1}) + \omega^{2}(\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2})(\varepsilon_{1}\alpha_{2} + \varepsilon_{2}\alpha_{1})] + \\ + i\omega[(\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2})(\gamma_{1}\alpha_{2} + \gamma_{2}\alpha_{1}) - (\varepsilon_{1}\alpha_{2} + \varepsilon_{2}\alpha_{1})(\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2})].$$

$$(20)$$

Тогда тангенс угла потерь в двухслойном диэлектрике в соответствии с (13) будет равен

$$tg\delta = \frac{(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)(\gamma_1\alpha_2 + \gamma_2\alpha_1) + \omega^2(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)(\varepsilon_1\alpha_2 + \varepsilon_2\alpha_1)}{\omega[(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)(\gamma_1\alpha_2 + \gamma_2\alpha_1) - (\varepsilon_1\alpha_2 + \varepsilon_2\alpha_1)(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)]} = = \frac{\omega^2(\varepsilon_2^2\gamma_1\alpha_1 + \varepsilon_1^2\gamma_2\alpha_2) + \gamma_1\gamma_2(\gamma_1\alpha_2 + \gamma_2\alpha_1)}{\omega[\varepsilon_2\gamma_1^2\alpha_2 + \varepsilon_1\gamma_2^2\alpha_1 + \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2(\varepsilon_1\alpha_2 + \varepsilon_2\alpha_1)]}.$$
(21)

Выражение (21) для tg δ записано через удельные характеристики ε_1 , γ_1 и ε_2 , γ_2 слоев диэлектрика. Для сравнения (21) с имеющимся результатом [6] следует, очевидно, перейти к сосредоточенным параметрам и рассматривать двухслойный диэлектрик как два последовательно соединенные коаксиальные конденсаторы с погонными емкостями [7].

$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon_1}{\ln r_1/r_0} \,; \tag{22}$$

$$C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_2}{\ln r_2/r_1} \tag{23}$$

и общими проводимостями q_1 и q_2 коаксиальных слоев (на единицу их длины в цилиндрической геометрии)

$$q_{1} = \frac{2\pi}{\ln\frac{r_{1}}{r_{0}}} \frac{1}{\rho_{1}} = \frac{2\pi\gamma_{1}}{\ln\frac{r_{1}}{r_{0}}};$$
(24)

$$q_2 = \frac{2\pi}{\ln\frac{r_2}{r_1}} \frac{1}{\rho_2} = \frac{2\pi\gamma_2}{\ln\frac{r_2}{r_1}},$$
(25)

где ρ_1 , ρ_2 – удельные объемные сопротивления первого и второго слоев диэлектрика, соответственно.

Выражения (24), (25) получены из следующих соображений.

Сопротивление dR элементарного цилиндра толщиной dr и средним радиусом r равно

$$dR \approx \rho \frac{dR}{2\pi r}$$
.

Тогда интегрируя последнее выражение в пределах от начального значения радиуса слоя диэлектрика r_{μ} до конечного значения радиуса этого слоя r_{κ} получаем полное активное сопротивление выбранного слоя цилиндрического диэлектрика на единицу длины цилиндра

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \int_{r_{\mu}}^{r_{\kappa}} \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathbf{r}} = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{r_{\kappa}}{r_{\mu}}.$$

Поделив окончательно числитель и знаменатель (21) на $\alpha_1^2 \alpha_2^2$ получаем

$$tg\delta = \frac{\omega^2 (c_1^2 q_2 + c_2^2 q_1) + q_1 q_2 (q_1 + q_2)}{w [c_1 q_2^2 + c_2 q_1^2 + \omega^2 c_1 c_2 (c_1 + c_2)]}.$$
(26)

Выражение (26) совпадает с выражением [6] для частного случая двухслойного несовершенного диэлектрика, что полностью подтверждает правильность полученного здесь теоретического решения поставленной задачи определения тангенса угла потерь для произвольного количества цилиндрических коаксиальных слоев неидеального диэлектрика, находящегося в стационарном электрическом поле.

Теоретическое значение тангенса угла диэлектрических потерь для трехслойной экструдированной изоляционной конструкции. Этот практически важный случай имеет место в силовых кабелях на напряжение 6...500 кВ, тогда в изоляционной конструкции есть экран по жиле из проводящего полиэтилена, собственно изоляция из высококачественного изоляционного полиэтилена и наложенный поверх него экран по изоляции также из проводящего полиэтилена.

Приняв здесь n = 3 по формулам (9), (10), (13) последовательно вычисляем

$$\dot{Y} = \frac{\prod_{k=1}^{3} \dot{Y}_{k}}{\dot{\beta}} = \frac{\dot{Y}_{1} \dot{Y}_{2} \dot{Y}_{3}}{\dot{\beta}};$$
(27)

$$\dot{\beta} = \prod_{k=1}^{3} \dot{Y}_{k} \sum_{k=1}^{3} \dot{Y}_{k}^{-1} \alpha_{k} = \dot{Y}_{1} \dot{Y}_{2} \dot{Y}_{3} \left(\frac{1}{\dot{Y}_{1}} \alpha_{1} + \frac{1}{\dot{Y}_{2}} \alpha_{2} + \frac{1}{\dot{Y}_{3}} \alpha_{3} \right) =$$

$$= \dot{Y}_{2} \dot{Y}_{3} \alpha_{1} + \dot{Y}_{1} \dot{Y}_{3} \alpha_{2} + \dot{Y}_{1} \dot{Y}_{2} \alpha_{3};$$
(28)
$$\dot{Y}_{1}\dot{Y}_{2} = (\gamma_{1} + i\omega\varepsilon_{1})(\gamma_{2} + i\omega\varepsilon_{2}) = \gamma_{1}\gamma_{2} + i\omega\varepsilon_{2}\gamma_{1} + i\omega\varepsilon_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2} = = (\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2}) + i\omega(\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2});$$

$$(29)$$

$$\dot{Y}_{1}\dot{Y}_{3} = (\gamma_{1}\gamma_{3} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{3}) + i\omega(\varepsilon_{3}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{3}); \qquad (30)$$

$$\dot{Y}_{2}\dot{Y}_{3} = (\gamma_{2}\gamma_{3} - \omega^{2}\varepsilon_{2}\varepsilon_{3}) + i\omega(\varepsilon_{3}\gamma_{2} + \varepsilon_{2}\gamma_{3}); \qquad (31)$$

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{1}\dot{Y}_{2}\dot{Y}_{3} &= (\gamma_{1} + i\omega\varepsilon_{1})(\gamma_{2} + i\omega\varepsilon_{2})(\gamma_{3} + i\omega\varepsilon_{3}) = \\ &= [(\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2}) + i\omega(\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2})](\gamma_{3} + i\omega\varepsilon_{3}) = \\ &= (\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2})\gamma_{3} + i\omega\gamma_{3}(\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2}) + \\ &+ i\omega\varepsilon_{3}(\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2}) - \omega^{2}(\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2})\varepsilon_{3} = \\ &= [(\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2})\gamma_{2} - \omega^{2}(\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2})\varepsilon_{3}] + \\ &+ i\omega[\gamma_{3}(\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2}) + \varepsilon_{3}(\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2})]; \end{aligned}$$
(32)

$$\dot{\beta}^* = [(\gamma_2\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_2\varepsilon_3)\alpha_1 + (\gamma_1\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_3)\alpha_2 + (\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\alpha_3] - i\omega[(\varepsilon_3\gamma_2 + \varepsilon_2\gamma_3)\alpha_1 + (\varepsilon_3\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_3)\alpha_2 + (\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\alpha_3];$$
(33)

$$\begin{aligned} \prod_{k=1}^{3} Y_{k} \dot{\beta}^{*} &= \dot{Y}_{1} \dot{Y}_{2} \dot{Y}_{3} \dot{\beta}^{*} = \\ &= \{ [(\gamma_{1} \gamma_{2} - \omega^{2} \varepsilon_{1} \varepsilon_{2}) \gamma_{3} - \omega^{2} (\varepsilon_{1} \gamma_{2} + \varepsilon_{2} \gamma_{1}) \cdot \varepsilon_{3}] + \\ i \omega [\gamma_{3} (\varepsilon_{2} \gamma_{1} + \varepsilon_{1} \gamma_{2}) + \varepsilon_{3} (\gamma_{1} \gamma_{2} - \omega^{2} \varepsilon_{1} \varepsilon_{2})] \} \cdot \\ &\cdot \{ [(\gamma_{2} \gamma_{3} - \omega^{2} \varepsilon_{2} \varepsilon_{3}) \alpha_{1} + (\gamma_{1} \gamma_{3} - \omega^{2} \varepsilon_{1} \varepsilon_{3}) \alpha_{2} + (\gamma_{1} \gamma_{2} - \omega^{2} \varepsilon_{1} \varepsilon_{2}) \alpha_{3}] - \\ &- i \omega [(\varepsilon_{3} \gamma_{2} + \varepsilon_{2} \gamma_{3}) \alpha_{1} + (\varepsilon_{3} \gamma_{1} + \varepsilon_{1} \gamma_{3}) \alpha_{2} + (\varepsilon_{2} \gamma_{1} + \varepsilon_{1} \gamma_{2}) \alpha_{3}] \}; \end{aligned}$$

$$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}) \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_{2})] \cdot \\ &\cdot [(\gamma_{2} \gamma_{3} - \omega^{2} \varepsilon_{2} \varepsilon_{3}) \alpha_{1} + (\gamma_{1} \gamma_{3} - \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_{2})] \cdot \\ &\cdot [(\gamma_{2} \gamma_{3} - \omega^{2} \varepsilon_{2} \varepsilon_{3}) \alpha_{1} + (\gamma_{1} \gamma_{3} - \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}$$

После чего получаем теоретическое значение тангенса угла диэлектрических потерь для трехслойной изоляционной конструкции

$$tg\delta = \frac{[(\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2}) \cdot \gamma_{3} - \omega^{2}(\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2})\varepsilon_{3}]}{[(\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2}) \cdot \gamma_{3} - \omega^{2}(\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2})\varepsilon_{3}]} \times \\ \times \frac{\cdot [(\gamma_{2}\gamma_{3} - \omega^{2}\varepsilon_{2}\varepsilon_{3})\alpha_{1} + (\gamma_{1}\gamma_{3} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{3})\alpha_{2} + (\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2})\alpha_{3}]}{\cdot (-\omega)[(\varepsilon_{3}\gamma_{2} + \varepsilon_{2}\gamma_{3})\alpha_{1} + (\varepsilon_{3}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{3})\alpha_{2} + (\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2})\alpha_{3}]} + \\ \times \frac{+\omega^{2}[\gamma_{3}(\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2}) + \varepsilon_{3}(\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2})]}{+\omega[\gamma_{3}(\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2}) + \varepsilon_{3}(\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2})]} \times \\ \times \frac{\cdot [(\varepsilon_{3}\gamma_{2} + \varepsilon_{2}\gamma_{3})\alpha_{1} + (\varepsilon_{3}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{3})\alpha_{2} + (\varepsilon_{2}\gamma_{1} + \varepsilon_{1}\gamma_{2})\alpha_{3}]}{\cdot [(\gamma_{2}\gamma_{1} - \omega^{2}\varepsilon_{2}\varepsilon_{3})\alpha_{1} + (\gamma_{1}\gamma_{3} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{3})\alpha_{2} + (\gamma_{1}\gamma_{2} - \omega^{2}\varepsilon_{1}\varepsilon_{2})\alpha_{3}]}.$$
(37)

Последнее выражение хотя и является достаточно сложным, но содержит все необходимые параметры, зависящие от материала диэлектрика во всех трех слоях (γ_k , ε_k) и коэффициенты α_k , зависящие от цилиндрической геометрии, рассматриваемой изоляционной конструкции.

Выводы

- На основе математической модели воздействия стационарного электрического поля на несовершенный многослойный цилиндрический диэлектрик получены общие выражения для тангенса угла диэлектрических потерь при произвольном числе слоев с учетом тока смещения и тока проводимости.
- Получены выражения для тангенса угла диэлектрических потерь для частных случаев двухслойного и трехслойного диэлектриков, характерных для изоляции силовых кабелей и проводов со сшитой полиэтиленовой изоляцией.

Список литературы: 1. Патент на корисну модель № 39644, Україна. Потужний високовольтний кабель. МПК Н01 В 7/02 / Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Антонець Ю.П., Золотарьов В.В., Чопов С.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. 2. Патент на корисну модель № 39645, Україна. Високовольтний кабель з волоконно-оптичним термодатчиком. МПК Н01 В 7/02 / Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Антонець Ю.П., Золотарьов В.В., Чопов С.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. 3. Рудаков В.В., Рудаков С.В. Оптимизация конструкции коаксиального кабеля с многослойным диэлектриком // Электротехника и электромеханика. – 2004. - № 4. – С. 70-73. 4. Сканави Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: ГИТТЛ, 1949. – 497 с. 5. Золотарев В.В., Карпушенко В.П., Золотарев В.М., Науменко А.А. Распределение стационарного электрического поля в цилиндрическом неидеальном диэлектрике // Электротехника и электромеханика. - Харків: НТУ «ХПІ», 2008. - С. 65-69. 6. Сиротинский Л.И. и др. Техника высоких напряжений. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1940. – 247 с. 7. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергия, 1969. – 239 с. Поступила в редколлегию 07.10.2011

О.С.ЖУЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент «УкрДАЗТ», Харьков; *А.О.СОЛОВЙОВ*, студент, « ДонІЗТ», Харьков; *О.В.СУЄТА*, студент, «УкрДАЗТ», Харьков

ОЦІНКА КІЛЬКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ В КІЛЬЦЕВІЙ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ КОМУТАТОРІВ ЕТНЕRNET З ПІДТРИМКОЮ ПРОТОКОЛУ STP

В статті отримано аналітичний вираз для оцінки максимальної кількості потоків в трактах передачі кільцевої мережі для довільної кількості вузлів (комутаторів), який дозволяє визначити необхідну пропускну здатність трактів передачі кільцевих мереж Ethernet з урахуванням роботи протоколу STP.

In this paper an analytical expression for maximum estimating the number of threads in the channel network with ring topology to an arbitrary number of nodes (switches) has been given. This expression allows to reguired the necessary bandwidth in the channel network with ring topology using the protocol STP.

В статье получено аналитическое выражение для оценки максимального количества потоков в трактах передачи кольцевой сети для произвольного количества узлов (коммутаторов). Это выражение позволяет определить необходимую пропускную способность трактов передачи кольцевых сетей Ethernet с учетом работы протокола STP.

Технологія Ethernet є однією з економічних, швидкісних і вигідних з точки зору витрат [1]. В теперішній час до мереж Ethernet все частіше пред'являються підвищені вимоги до показників надійності, які в більшості випадків можна забезпечити шляхом використання мережі з кільцевою топологією [2, 3].

При реалізації кільцевої мережі Ethernet, треба використовувати протокол STP, так як технологія Ethernet у базовому варіанті не підтримує кільцеву топологію [1-4]. Ефективне функціонування мережі неможливе без правильного вибору пропускної здатності трактів передачі між вузлами мережі. На етапі проектування кільцевої мережі одним з важливих завдань є розрахунок необхідної пропускної здатності трактів передачі, яку можна визначити як максимальну кількість інформаційних потоків в трактах передачі. Таким чином виникає актуальна задача визначення максимальної кількості потоків в трактах передачі кільцевої мережі з метою оцінки пропускної здатності.

Метою роботи є отримання аналітичного виразу для оцінки максимального числа потоків в трактах передачі кільцевої мережі з довільною кількістю вузлів на основі комутаторів.

Для оцінки максимальної кількості потоків розглянемо кільцеву мережу на прикладі мережі з 6 вузлами, де введені такі умовні позначення:

М_i – комутатор *i*-го вузла;

 $L_{i/j}$ – з'єднувальна лінія між узлами *i* та *j*;

 $F_{k/l}$ – загальний потік, що проходить по лінії $L_{k/l}$;

 $f_{i/i}$ – потік між вузлами M_i та M_i ;

В даному прикладі будемо вважати що *M*₁ – кореневий комутатор, а лінія *L*_{3/4} – штучно відключена протоколом STP.



Рисунок 1 – Приклад мережі з кільцевою топологією при роботі протоколу STP

Знайдемо вираз, який дозволяє обчислити максимальну кількість потоків у довільній лінії в кільцевій мережі з будь-якою кількістю вузлів, при використанні протоколу STP.

Спочатку знайдемо кількість потоків у будь – якій лінії кільця. Для цього розіб'ємо його умовною лінією у довільному місці. Один кінець лінії, який розбиває кільце, повинен перетинати ту лінію, в якій ми шукаємо кількість потоків, а інший кінець повинен перетинати лінію, яка розірвана, або відключена протоколом STP. Наприклад, розіб'ємо кільце у лінії $L_{1/2}$, як це показано на рис. 2, *a*.



Рисунок 2 – Розбивання кільця умовною лінією (а) та розподіл на 2 умовні області (б)

Далі визначаємо скільки вузлів перебуває по одну сторону досліджуваної лінії (до розірваної) і по іншу. Таким чином, отримуємо дві нові області, які показані на рис. 2, б. Кожний комутатор з області 1 може зв'язатися з кожним комутатором області 2 і зв'язок буде здійснюватися через лінію $L_{1/2}$. Представимо що всі комутатори з області 1 мають зв'язок зі всіма комутаторами з області 2 (кожен з кожним). Тоді для того щоб визначити кількість потоків, які проходять через дану лінію, можна перемножити кількість комутаторів з області 1 на кількість комутаторів з області 2.

Розподіл на дві області можна представити як взаємозв'язок між вузлами у іншому вигляді так, як це показано на рис. 3. Таким чином потоки: $f_{1/2}$, $f_{1/3}$, $f_{4/2}$, $f_{4/3}$, $f_{5/2}$, $f_{5/3}$, $f_{6/2}$, $f_{6/3}$ проходять по лінії $L_{1/2}$, коли лінія $L_{3/4}$ – розірвана, на рис. 3 вони знаходяться у пунктирному колі.



Рисунок 3 – Наглядний взаємозв'язок між вузлами у кільці

Число потоків можна знайти як добуток числа вузлів, які знаходяться в кожній області, тому для того щоб знайти максимальну кількість потоків у лініях з будь-якою кількістю вузлів, при використанні протоколу STP, розіб'ємо кільце на 2 рівні частини умовною лінією. Якщо кількість вузлів у кільці непарна, то розбити кільце на дві області, у яких кількість вузлів дорівнюють друг другу, неможливо. Тобто у результаті розбивки ми отримуємо, що у одній області буде на одиницю вузлів більше,ніж у другій області. У такому разі, відношення N/2, яке характеризує кількість вузлів в одній області, будемо округляти в більшу сторону, а у другій області – у меншу – N/2. Якщо ж кількість вузлів у кільці парна, то кількість вузлів в області дорівнюють один одному. Тобто у такий спосіб можна розмістити вузли мережі по областям, щоб кількість вузлів в областях були рівними N/2.

Перемножуючи кількість вузлів у утворених областях, отримаємо максимальну кількість потоків, яка може проходити у тракті передачі кільцевої мережі з будь-якою кількістю вузлів, при використанні протоколу STP:

$$F1 = \left] \frac{N}{2} \left[\cdot \left[\frac{N}{2} \right] \right] = \left[\left(\frac{N}{2} \right)^2 \right]; \tag{1}$$

де *N* – кількість комутаторів у кільці.

Висновки. Отримано аналітичний вираз для оцінки максимальної кількості потоків в трактах передачі кільцевої мережі для довільної кількості вузлів (комутаторів). Цей аналітичний вираз дозволяє визначити необхідну пропускну здатність трактів передачі кільцевих мереж Ethernet з урахуванням роботи протоколу STP.

Список літератури: 1. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы [Текст]: учебник для вузов / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2011. – 944 с. 2. Амато. Основы организации сетей Сізсо, том 1 [Текст]: учебное пособие для студентов сетевой академии Сізсо / Амато, Вито. – испр. изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильяме», 2004. – 512 с. 3. Кеннеди К. Принципы коммутации в локальных сетях Сізсо [Текст]: учебное пособие для студентов сетевой академии Сізсо / К.Кеннеди, К.Гамильтон. – Издательство «Вильямс», 2003. – 976 с. 4. Ирвин Дж. Передача данных в сетях: инженерный подход [Текст]: учебное пособие / Дж. Ирвин., Д. Харвин: Пер. с англ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 448 с.

Надійшла до редколегії 20.10.2011

УДК 621.396

В.В.КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, зав. отд., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»; *А.Э.ГОРЮШКИН*, аспирант, НТУ «ХПИ»; *А.Ю.СКОБЛИКОВ*, аспирант, НТУ «ХПИ»

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ СТЕРЖНЕВОГО МОЛНИЕПРЕМНИКА

У статті представлені результати чисельного моделювання розподілу напруженості електричного поля по поверхні блискавкоприймача залежно від різних форм стержня. Розглянуті стержневі блискавкоприймачі, в перерізі яких круг квадрат і правильний шестикутник. Сформульована гіпотеза про перевагу блискавкоприймача квадратного перерізу.

In the article the results of numeral design of distribution of the electric-field tension are presented for the lightning terminal surface on the different forms of bar. The lightning terminal is considered, in the section of which circle, square and hexagon. A hypothesis is set forth about advantage of lightning terminal of square section.

В статье представлены результаты численного моделирования распределения напряженности электрического поля по поверхности молниеприемника в зависимости от различных форм стержня. Рассмотрены стержневые молниеприемники, в сечении которых круг, квадрат и правильный шестиугольник. Сформулирована гипотеза о преимуществе молниеприемника квадратного сечения.

Введение. Основой систем молниезащиты зданий и сооружений от прямых попаданий молнии являются металлические конструкции в виде стержневых, тросовых и сеточных молниеприемников. Рекомендации по устройству таких систем и оценке их защитных свойств содержатся в стандарте Межлународной электротехнической комиссии IEC 62305-3; 2006 [1]. 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 молниеприемника Франклина (FLR). К числу таких устройств относятся, так называемые «Early streamer emission air terminals» (ESE), которые обеспечивают более быстрое по сравнению с FLR создание встречного стримера, способствующего перехвату молнии. Декларируемый радиус защиты ESE молниеприемников пропорционален времени опережения. Методика определения времени опережения регламентируется стандартом Франции NF C 17-102: 1995 [2]. При проведении испытаний регистрируется время пробоя воздушного промежутка, которое отсчитывается от момента начала нарастания импульсного электрического поля. Критерием оценки эффективности ESE молниеприемника является среднее арифметическое значение ΔT , полученное в результате статистической обработки 100 измерений.

Быстродействие молниеприемника зависит от степени ионизации окружающего воздушного пространства. Если ионизация активная, то создается облако зарядов, которое затрудняет начало прорастания встречного лидера. Если ионизация слабая, отсутствуют заряды, необходимые для формирования лавины, что приводит к увеличению времени ожидания. Следовательно, можно предположить, что существует определенный уровень тока короны с молниеприемника, являющийся оптимальным с точки зрения времени формирования встречного лидера. Ток короны возникает при достижении напряженности электрического поля на поверхности стержня критического значения, равного 3,0 МВ/м. В работе представлены результаты расчетной оценки уровня напряженности электрического поля на поверхности стержневых молниеприемников различной формы.

Цель работы определение закономерности распределения напряженности электрического поля на поверхности стержневых молниеприемников различной формы.

Постановка задачи. Расчетная модель состоит из 2 дисковых электродов и стержневого молниеприемника, помещенных в воздушное пространство (см. рис. 1). Исходные данные модели:

Радиус стержня r = 0.05м; Высота стержня h = 2м; Высота между электродами H = 5м; Радиус электродов R = 10м; Потенциал верхнего электрода U = 10 000 B;



Рисунок 1 – Расчетная модель системы электродов

Материал электродов и стержня – медь. Форма сечения стержня: круг, квадрат, шестиугольник и восьмиугольник.

Результаты расчетов. Для решения поставленной проблемы осуществлен расчет нескольких вариантов задачи отличающихся вариацией одного из параметров конструкции системы. Остальные параметры сохранялись соответствующими исходным. Все расчеты проведены в трехмерном пространстве.

1. Исследовано распределение напряженности поля на поверхности стержня с сечением в форме круга в зависимости от вариации высоты между электродами (H). Расстояние между электродами изменялось в диапазоне от 4.5 до 8 метров. Результаты моделирования предоставлены на рис. 2.



На рис. 2 представлено распределение значения напряженности электрического поля вдоль радиуса стержня на его торцевой поверхности (до r = 0,05) и далее в воздушном пространстве. Как видно из графиков с увеличением расстояния между электродами напряженность поля на поверхности стержня также уменьшается. В данном случае, этот эффект связан с тем, что разность потенциалов между плоскостями полеобразующей системы оставалась одинаковой (U = 10^4 B). При пересчете результатов на условия одинакового значения напряженности электрического поля (E = 2 кВ/м), расхождение между кривыми существенно уменьшилось.

2. Исследовано распределение напряженности поля на поверхности стержня с сечением в форме круга в зависимости от вариации радиуса стержня (г). Изменение радиуса стержня производилось в диапазоне от 0,02 до 0,06 м.

Отчетливо видно, что с уменьшением площади торца молниеприемника растет напряженность электрического поля, формирующегося вблизи его торца. Зависимость напряженности от радиуса достаточно точно описывается кривой второго порядка (гиперболой).



3. Исследовано распределение напряженности поля на поверхности стержня с сечением в форме круга (r = 0,05 м) в зависимости от вариации высоты стержня (h). Высота стержня изменялась в диапазоне от 1 м до 4 м при постоянном значении расстояния между плоскостями (H = 5м).

Как видно из рис. 4 при увеличении высоты стержня молниеприемника растет максимальное значение напряженности электрического поля прямо пропорционально высоте стержня. Следовательно, при таких соотношениях высоты стержня и расстояния между плоскостями не наблюдается эффекта близости. Иными словами, напряженность поля на торце стержня определяется его высотой и значением напряженности электрического поля, в котором стержень находится.





Рисунок 5 – Результат решения задачи для стержня квадратного сечения (радиус описанной окружности 0,05 м)

4. Исследовано распределение напряженности поля на поверхности стержня для стержней с различной формой сечения. Выбрано четыре формы сечения стержня: круг, квадрат, правильный шестиугольник и правильный восьмиугольник. Для иллюстрации на рис. 5 и рис. 6 представлены результаты решения трехмерных моделей для стержневых молниеприемников различных форм. Все графики напряженности поля в построены вдоль прямой, лежащей в плоскости торца стержня, проходящей от его центра к углу стержня. Графики изменения напряженности поля в зависимости от формы стержня

показаны на рис. 7. Для круглого сечения распределение дано в вдоль радиуса торцевой поверхности.

Из результатов, представленных на рис. 7, можно сделать вывод о том, что при прочих равных условиях, напряженность электрического поля на угле стержневого молниеприемника квадратного сечения максимальна по сравнению с другими рассмотренными формами сечения. Этот вывод важен для выбора молниеприемника, которому будет придан статус образцового.



Рисунок 6 – Результат решения задачи для стержня с сечением в виде правильного шестиугольника (радиус описанной окружности 0,05 м)

Рисунок 8 – Иллюстрация напряженного объема стержня молниеприемника круглого сечения

Рисунок 9 – Иллюстрация напряженного объема стержня молниеприемника квадратного сечения

Однако, локальное высокое значение напряженности электрического поля само по себе не является достаточным условием обеспечения пробоя воздушного промежутка. Для этого, по аналогии с работой [3], необходимо наличие определенного «напряженного объема», в котором значение напряженности электрического поля превосходит значение $E_{kp} = 30$ кВ/см, при котором возникает ионизация воздуха. Проведено сравнение критических объемов для стержневых молниеприемников с круговым и квадратным сечением. Оказалось, что незначительное превышение характерно для случая квадратного се-

чения. В качестве иллюстрации, на рис. 8 и рис. 9 представлены результаты расчета напряженного объема для стержней круглого и квадратного сечений, соответственно. Следовательно, и по этому параметру стержень квадратного сечения имеет преимущество.

5. Типичной формой молниеприемника Франклина является круговой стержень, с острым в виде конуса концом. Расчет напряженности поля на поверхности острия стержня проведен вдоль образующей конуса стержня. Высота острия стержня выбрана равной 0,05 и 0,1 м. (при r = 0,05 м). Для иллюстрации, на рис. 10 представлено решение соответствующей задачи.

Графики напряженности поля в зависимости от изменения высоты острия стержня предоставлены на рис. 11.

Рисунок 10 – Результат решения задачи для стержня с острием

84

Исследование распределения напряженности поля на поверхности такого молниеприемника показало существенное превышение напряженности электрического поля на вершине острия конуса по сравнению с рассмотренными ранее вариантами стержней. Однако, величина «напряженного объема» не превосходит значений, характерных для других вариантов молниеприемников. Из указанных выше расчетов видно, что для достижения максимального значения напряженности поля, а также напряженного объема на поверхности стержневого электрода при прочих равных условиях целесообразно использовать стержневой молниеприемник с квадратным сечением.

Выводы. На основании результатов численного моделирования напряженности электрического поля на поверхности стержневого молниеприемника различных форм установлено, что молниеприемник квадратного сечения имеет наибольшее значение напряженности электрического поля при прочих равных условиях.

Полученные результаты являются основой для построения шаблона функциональной зависимости напряженности электрического поля на поверхности стержня, что повысит эффективность реализации плана многофакторного эксперимента.

Литература. 1. IEC 62305-3: 2006. Protection against Lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard. 2. NF C 17-102: 1995. Lightning protection. Protection of structures and open areas against lightning using early streamer emission air terminals. 3. *Рудаков В.В.* Сильні електричні поля в конденсаторних конструкціях та удосконалення високовольтних силових конденсаторів». Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.13. – Техніка сильних електричних та магнітних полів. – Харківський державний політехнічний університет, Харків, 1999.

Поступила в редколлегию 14.10.2011

В. В. КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, зав. отд., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»; *Ю. С. НЕМЧЕНКО*, главн. метролог, НТУ «ХПИ»; *И. П. ЛЕСНОЙ*, зав. лаб, НТУ «ХПИ»; *С. Б. СОМХИЕВ*, вед. инж., НТУ «ХПИ»

ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОГО АВИАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ВОСПРИИМЧИВОСТЬ К ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ, ВЫЗВАННЫМ МОЛНИЕЙ («КАБЕЛЬНАЯ ИНЖЕКЦИЯ», ФОРМА 1,2)

Описано конструкцію та результати атестації генератора, призначеного для випробувань бортового авіаційного обладнання на сприйнятливість до перехідних процесів, які викликані блискавкою, відповідно до вимог міжнародних стандартів. Генератор виробляє імпульси напруги та струму форми 1,2 з п'яти рівнів випробувань, випробування проводяться методом «кабельної інжекції».

The construction and the results of the attestation of the generator intended for testing of the on-board aircraft equipment on susceptibility to fast transient process, caused lightning, according to International standards are described. The apparatus generates the test voltage and current of the form 1.2 on five levels of testing, tests are conducted by method «Cable injection».

Описана конструкция и результаты аттестации генератора, предназначенного для испытания бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией, в соответствии с требованиями международных стандартов. Генератор производит импульсы напряжения и тока формы 1,2 по пяти уровням испытаний, испытания проводятся методом «кабельной инжекции».

В настоящее время обязательным видом испытаний бортового электротехнического и электронного оборудования (БАО) летательных аппаратов являются испытания на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией. Эти процессы возникают при прямом ударе молнии в корпус летательного аппарата и последующем растекании токов молнии по различным металлическим узлам этих аппаратов, в частности, по межблочным линиям связи (МЛС).

Высокая поражающая эффективность токов растекания объясняется тем, что при этом в МЛС возникают различного вида наведенные высокие импульсные напряжения и большие токи, представляющие собой серьезную угрозу для современной слаботочной электроники БАО.

Поэтому стойкость к переходным процессам, вызванным молнией, выделена в отдельный вид испытаний, который регламентируется нормативным документом EUROCAE ED-14D/ RTCA-DO-160D «Условия окружающей среды и методики испытаний бортового оборудования», Раздел 22: «Восприимчивость к переходным процессам, наведенным молнией» (отечественный аналог этого документа KT-BBФ/DO-160D/ED-14D/ [1]). Этот НД с 2004 года распространяется и на все типы БАО, выпускаемые в Украине и странах СНГ.

Данный вид испытаний содержит три независимых метода испытаний:

- испытания «контактным вводом»;
- испытания «кабельной инжекцией»;
- испытания «вводом в заземление».

В данной статье мы остановимся только на методе испытаний «кабельной инжекцией», при котором испытательные импульсы заданной формы и амплитуды индуцируются в проводниках МЛС при помощи инжектирующего трансформатора. Этот метод используется для проверки способности самолетного оборудования выдерживать внутренние электромагнитные эффекты, создаваемые внешним воздействием молний без функциональных отказов и повреждений.

Идеологическая схема формирования импульсов напряжения и тока требуемой формы приведена на рис. 1.

Рисунок 1 - Схема формирования импульсов напряжения и тока

В этой схеме конденсатор C_p , заряжаемый до определенного напряжения, разряжается с частотой 1 МГц через управляемый механический коммутатор К на первичную обмотку импульсного трансформатора ИТ-1,2 (инжектора), который и является основным элементом схемы. ИТ-1,2 состоит из 2-х одновитковых обмоток, охватывающих незамкнутый ферритовый сердечник ИТ-1,2. Этот сердечник состоит из двух блоков по 12 склеенных вместе ферритов (в первом блоке ферриты имеют П-образную форму с габаритами 50 х 30 х 37 мм в каждом) и во втором блоке используются ферриты в виде прямоугольной перемычки. Эти два блока общей шириной 363 мм стянуты вместе и размещены в разъемном изоляционном корпусе. Обе половины этого корпуса соединены при помощи петлевого соединения. При сведении обеих половин корпуса остается зазор 0,5 мм для того, чтобы сердечник не насыщался.

Первичная обмотка представляет собой один виток плоской медной шины сечением 15 х 0,25 мм², концы которой выведены на входные клеммы ИТ-1,2 ХР2. Вторичная обмотка («контрольный контур» – КК) представляет собой массивный виток, концы которого выведены на выходные клеммы XP3. Габариты ИТ-1,2 455х130х115 мм.

Прообразами для создания данного испытательного генератора служили ранее созданные у нас и длительно эксплуатируемые установки , имитирующие импульсы грозовых разрядов на борту летательных аппаратов, а именно: установка УИМ по стандарту ОСТ 1 01160-88 [2], установка УИГ по стандарту ГОСТ 30586-95 [3] и генератор ИГЛА-КИ-3 по стандарту КТ-ВВФ/DO-160D/ED-14D/ [4]).

Генератор ИГЛА-КИ-1,2 предназначен для проведения испытаний «кабельной инжекцией» БАО в полном объеме с требованиями НД [1] испытательными импульсами напряжения и тока формы «1,2» обеих полярностей по пяти уровням испытаний. В табл. 1 приведены требования к форме и АВП испытательных импульсов напряжения и тока, которые с учетом допусков в полном объеме реализованы в генераторе ИГЛА-КИ-1,2.

	ichepatopa III JIA-KII-1,2										
]	l	2								
Параметр	Ток I _{ucn} (ф.1)	Напряжение U_{nped} (ф. – н/н)	Напряжение <i>U_{ucn}</i> (ф.2)	Ток <i>I_{пред}</i> (в идеале - ф.1)							
1	2	3	4	5							
 Испыта- тельный комплект 	$ \begin{array}{c} I \\ $	U U_{m} U_{m} U_{m} T_{n} $T_{0,5}$	U U_{m} \downarrow U_{m} \downarrow T_{u} $T_{0,5}$	$ \begin{array}{c} I \\ I_m \\ \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \\ I_{0,5} \end{array} $							
2. Уровни											
испытаний:											
- 1	(100 + 10) A	\leq 50 B	(50 + 5) B	$\leq 100 \text{ A}$							
- 2	(250 + 25) A	≤125 B	(125 + 13) B	\leq 250 A							
- 3	(600 + 60) A	\leq 300 B	(300 + 30) B	$\leq 600 \text{ A}$							
- 4	(1500 + 150) A	\leq 750 B	(750 + 75) B	\leq 1500 A							
- 5	(3200 + 320) A	$\leq 1600 \text{ B}$	(1600 + 160) B	\leq 3200 A							
3. Время нараста- ния, <i>T_н</i> , мкс	6,4 ± 1,28	не нормиро- вано	≤ 0,1	6,4 ± 1,28							
4. Время спада, <i>T</i> _{0,5} , мкс	69 ± 13,8	не нормиро- вано	6,4 ± 1,28	69 ± 13,8							

Таблица1 – Основные нормированные точностные характеристики генератора ИГЛА-КИ-1,2

Генератор ИГЛА-КИ-1,2 представляет собой высоковольтную электроразрядную установку с программируемым таймером-коммутатором, которая генерирует однократные испытательные импульсы напряжений и тока форм «1» и «2» обеих полярности по пяти уровням испытаний, которые можно подавать на БАО с программируемыми количеством испытательных импульсов и интервалами между ними.

Общий вид генератора ИГЛА-КИ-1,2 с инжектирующим трансформатором ИТ-1,2 приведен на рис. 2, а передняя панель генератора – на рис. 3.

Рисунок 2 – Общий вид генератора ИГЛА-КИ-1,2 с ИТ-1,2

Рисунок 3 – Передняя панель генератора ИГЛА-КИ-1,2

Генератор ИГЛА-КИ-1,2 собран в металлическом корпусе с габаритами 480х210х495 мм. На передней панели ИГЛА-КИ-1,2, рис. 3, расположены следующие органы управления и контроля:

- клавиша СЕТЬ с подсветкой служит для подачи напряжения питания 220 В 50 Гц на генератор ИГЛА-КИ-1,2 и для его отключения после окончания работы;
- разъем ~ 220 В служит для подключения к генератору ИГЛА-КИ-1,2 сетевого кабеля;
- «3А» предохранители;
- переключатель ФОРМА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА служит для установления формы испытательного напряжения генератора ИГЛА-КИ-1,2 и имеет два положения: «1» и «2»;
- переключатель ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ служит для установления уровня испытательного напряжения генератора ИГЛА-КИ-1,2 и имеет пять положений: «1», «2», «3», «4», «5»;
- ручка РЕГУЛИРОВКА U_{зар} служит для установки зарядного напряжения генератора ИГЛА-КИ-1,2 на красные риски на микроамперметре;
- ТАБЛО ПТК служит для отображения параметров циклограмм работы генератора ИГЛА-КИ-1,2;
- кнопка СТАРТ/СТОП служит для запуска и остановки генератора ИГЛА-КИ-1,2;
- кнопки «↑» и «↓» КОЛ. ИМП. служат для изменения количества испытательных импульсов;
- кнопки «↑» и «↓» ИНТЕРВ. служат для изменения интервала между испытательными импульсами;
- световой индикатор РАЗРЯД слева от ТАБЛО ПТК служит для контроля срабатывания генератора ИГЛА-КИ-1,2.

Рисунок 4 – Расположение элементов внутри корпуса генератора ИГЛА-КИ-1,2

На задней панели генератора ИГЛА-КИ-1,2 расположены следующие органы управления и контроля:

- разъем ВЫХОД служит для подключения генератора ИГЛА-КИ-1,2 к ИТ-1,2 при помощи соединительного кабеля КС-ИТ-1,2;
- клемма ⊥ служит для подключения генератора ИГЛА-КИ-1,2 к контуру заземления.

Расположение элементов внутри корпуса генератора ИГЛА-КИ-1,2 приведено на рис. 4.

Блок-схема генератора ИГЛА-КИ-1,2 приведена на рис. 5.

Рисунок 5 – Блок-схема генератора ИГЛА-КИ-1,2

- УВС узел ввода сетевого напряжения;
- ПВУ повысительно-выпрямительное устройство;
- БЕН блок емкостных накопителей;
- БК блок коммутаторов;
- БН блок нагрузок;
- ПТК программируемый таймер-коммутатор;
- БПТ блок питания ПТК;
- БИВ блок измерения входного напряжения;
- ИТ-3 инжектирующий трансформатор;
- БАО бортовое авиационное оборудование

На рис. 6-7 приведены тест-осциллограммы испытательного тока положительной и отрицательной полярностей и импульсов напряжения испытательного комплекта 1 для пятого испытательного уровня, а на рис. 8 и 9 – тест-осциллограммы испытательного напряжения и предельного тока 2 комплекта 5 уровня положительной и отрицательной полярностей.

Согласно нормативному документу КТ-ВВФ/DO-160D/ED-14D/ испытания методом КАБЕЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ – это метод испытаний, при котором испытательные импульсы напряжений и токов индуцируются в межблочные линии связи (МЛС) БАО.

Для испытания БАО методом нагружения МЛС импульсами тока и напряжения в ИТ-1,2 необходимо собрать схему по рисунку 10. При этом в раскрытый ферритовый блок ИТ-1,2 вложить испытываемую МЛС, после чего закрыть ИТ-1,2 и стянуть его фиксирующей шпилькой.

Рисунок 7 – Типовые осциллограммы предельного напряжения 1 комплекта 5 уровня положительной и отрицательной полярностей (1500 В)

Рисунок 8 – Типовые осциллограммы испытательного напряжения 2 комплекта 5 уровня положительной и отрицательной полярностей (1600 В)

Рисунок 9 – Типовые осциллограммы предельного тока 2 комплекта 5 уровня положительной и отрицательной полярностей (1915 A)

Рисунок 10 – Схема испытаний БАО с МЛС: Г-ИГЛА-КИ-1,2 – испытательный генератор; Р6015А – щуп высоковольтный Р6015А 1000Х; ЭО – осциллограф ТЕКТRONIX TDS1012; МЛС – межблочные линии связи; БАО-1, БАО-2 – испытываемое оборудование

Затем на передней панели генератора установить требуемую форму испытательного импульса и испытательный уровень, а на ТАБЛО ПТК установить заданные по программе испытаний количество испытательных импульсов и интервал между ними. Остается только нажать кнопку СТАРТ и испытания пройдут автоматически с заданной циклограммой испытаний.

Выводы: Генератор ИГЛА-КИ-1,2 прошел государственную первичную аттестацию в ГП «Харьковстандартметрология», а затем начал опытную экс-

плуатацию в НИО-2 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» при проведении испытаний БАО методом «кабельной инжекции» на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией.

Список литературы: 1. КТР-ВВФ /DO-160D/ED-14D/. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. (Внешние воздействующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 22.0 Восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией. 2. Князее В.В., Краеченко В.И., Лесной И.П., Немченко Ю.С., Сомхиев С.Б. Установка для испытаний бортового оборудования самолетов и вертолетов на молниестойкость типа УИМ // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Випуск 3(9). – Харків, 2006. – С. 43-45. 3. Князее В.В., Немченко Ю.С., Лесной И.П., Лантушко Б.Н., Дорошенко А.В. Установка для испытаний технических средств на молниестойкость УИГ // Вестник НТУ «ХПИ» «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Выпуск № 17. – 2006. – С. 3-9. 4. Князее В.В., Немченко И.Б. Б Генератор для проведения испытаний бортового высоких напряжений». – Выпуск № 17. – 2006. – С. 3-9. 4. Князее В.В., Немченко Ю.С. Б Генератор для проведения испытаний бортового высоких напряжений». – Выпуск № 17. – 2006. – С. 3-9. 4. Князее В.В., Немченко Ю.С. Б Генератор для проведения испытаний бортового высоких напряжений». – Выпуск № 17. – 2006. – С. 3-9. 4. Князее В.В., Немченко Ю.С. Б Генератор для проведения испытаний бортового высоких напряжений». – Выпуск № 11. – 2009. – С. 45-53.

Поступила в редколлегию 11.10.2011.

УДК 621.31

В.В. КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, зав.отд., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»; *А.Ю.СКОБЛИКОВ*, аспирант, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

АЛЬТЕРНАТИВНАЯ МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ РАДИОЧАСТОТНЫХ ПОЛЕЙ

В статті наведено обгрунтування методики випробувань несприйнятливості бортового обладнання літаків до дії високо інтенсивних електромагнітних полів. Методика базується на застосуванні випробувального обладнання, яке є у наявності в лабораторіях України. Методика дозволяє суттєво зменшити вартість таких випробувань при тій же достовірності отриманого результату відносно рівня несприйнятливості. Методика базується на застосуванні методу діагностики електромагнітних екранів, який розроблено авторами.

In the article a ground over of methodology of tests of immunity of side equipment of airplanes is brought to the action highly intensive electromagnetic fields. Methodology is based on application of proof-of-concept equipment, which a presence in the laboratories of Ukraine has. Methodology allows substantial to bring down the cost of such tests, for storage of authenticity of the got result in relation to the level of immunity. Methodology is based on application of method of diagnostics of electromagnetic screens, which is worked out by authors.

В статье приведено обоснование методики испытаний невосприимчивости бортового оборудования самолетов к действию высоко интенсивных электромагнитных полей. Методика базируется на применении испытательного оборудования, которое есть в наличии в лабораториях Украины. Методика позволяет существенное снизить стоимость таких испытаний, при сохранении достоверности полученного результата относительно уровня невосприимчивости. Методика базируется на применении метода диагностики электромагнитных экранов, который разработан авторами.

Введение. Безопасность полета летательного аппарата (ЛА) зависит от устойчивости бортового оборудования к внешним воздействиям. Управление современными ЛА, как правило, осуществляется в автоматическом режиме. Решения, принимаемые бортовым компьютером, основываются на показаниях устройств контроля (датчиков) параметров функционирования элементов ЛА. Датчики, которые обеспечивают оперативную передачу информации о текущем состоянии оборудования, расположены по всему ЛА. Линии связи между датчиками и устройствами обработки информации от датчиков выполняются в виде неэкранированных проводов, с использованием фюзеляжа ЛА в качестве общей «земли». Сигналы управления от бортового компьютера к исполнительным механизмам, также передаются по проводным неэкранированным линиям. Длина линий связи может достигать десятков метров. Указанные выше обстоятельства делают систему контроля и управления полетом потенциально чувствительной к внешним электромагнитным помехам. Наибольшую опасность представляют мощные импульсные электромагнитные помехи, сопровождающие молниевый разряд и высокоинтенсивные радиочастотные электромагнитные поля (HIRF), создаваемые радарами, в том числе аэродромными. Поэтому, подтверждение устойчивости бортового оборудования к действию таких электромагнитных помех являются обязательным требованием при сертификации ЛА. Амплитудновременные параметры рассматриваемых электромагнитных помех задаются рядом нормативных документов, действующих в Украине:

Межгосударственный стандарт ГОСТ 30585-98 [1] определяет амплитудно-временные параметры электрического, магнитного и электромагнитного полей, сопровождающих молниевый разряд. Основные значения этих параметров представлены в табл. 1.

raomita i Oenobilbie napamerphi Swiri Mommeboro paspinda [1]							
Вид поля	Форма волны	Граничная	Длина	Максимальный			
		частота, кГц	волны, м	уровень			
Е	0,1/10 мс	7,2	41782	300 кВ/м			
Н	2/50 мкс	778	386	300 А/м			
ЭМП (Е)	0.1/1 мисо	7200	42	100 кВ/м			
ЭМП (Н)	0,1/1 MKC			250 А/м			

Таблица 1 – Основные параметры ЭМП молниевого разряда [1]

Авиационный нормативный документ Квалификационные требования КТ-160D [2], устанавливает требования к уровням испытательного электромагнитного поля в диапазоне от 300 МГц до 12 ГГц. В качестве иллюстрации, в табл. 2 приведены наиболее «жесткие» параметры HIRF для оборудования категории L, в диапазоне частот от 1 ГГц до 1 ГГц.

Диапазон частот, ГГц	1-2	2-4	4-6	6-8	8-12	12-18		
Амплитуда, В/м	5000	6000	7200	1100	5000	2000		

Таблица 2 – Параметры HIRF для оборудования категории L [2]

Для проведения требуемых испытаний уровня устойчивости бортового оборудования необходимо обеспечить создание электромагнитных полей с указанными выше параметрами. Импульсные поля, сопровождающие молниевый разряд, в полной мере воспроизводятся парком высоковольтных установок, эксплуатируемых в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» [3]. Создание полей, с параметрами, указанными в табл. 2, является весьма сложной и достаточно дорогостоящей задачей. Сегодня она решена только в наиболее экономически развитых странах. Кроме того, такие испытания каждой отдельной системы бортового оборудования не дают полной гарантии надежной работы всего комплекса ЛА. Подтверждение летной годности осуществляется только в процессе испытаний ЛА в целом. Однако, для разработчиков чрезвычайно важно иметь возможность проведения исследований, которые могут дать оценку уровня устойчивости оборудования к таким полям. Следовательно, разработка альтернативной методики испытаний, базирующихся на имеющейся материальной базе Украины, является актуальной.

Цель статьи — Обоснование альтернативной методики испытаний устойчивости бортового оборудования летательных аппаратов к действию высокоинтенсивных радиочастотных полей HIRF.

1 Концепция методики

Обеспечение высокого уровня устойчивости радиоэлектронного оборудования к действию сторонних электромагнитных помех невозможно без использования корпуса оборудования в качестве электромагнитного экрана [4-6]. Эффективность экранирования электромагнитных полей (особенно высокочастотных) практически полностью определяется степенью электромагнитной герметичности корпуса. Авторами, предложен метод [7], основанный на измерении эффективности экранирования корпусом электромагнитного поля с частотой, совпадающей с одной из резонансных частот (обычно первой) корпуса. Метод позволяет определить эффективность экранирования с учетом реальной системы передачи информации. Если корпус не содержит структурных неоднородностей стенок, то его защитные свойства улучшаются с ростом частоты воздействующего электромагнитного поля. Следовательно, нет необходимости проводить испытания устойчивости к действию сверхвысокочастотных интенсивных полей, если их уровень в результате ослабления экраном становится соизмерим с уровнем полей мобильной и космической радиосвязи.

2 Основные положения методики

Методика испытаний устойчивости бортового оборудования летательных аппаратов к воздействию высокоинтенсивных радиочастотных полей включает в себя следующие этапы:

2.1 Испытание устойчивости оборудования к действию высокоинтенсивного электромагнитного поля с параметрами, указанными далее:

 электромагнитное поле монохроматическое модулированное колебанием типа «меандр» глубиной не менее 90% с частотой следования 1 кГц;

- напряженность электрического поля (50 ± 5) В/м;

- диапазон изменения частоты от 80 МГц до 3 ГГц.

2.2 Расчетная оценка экранирующих свойств корпусов блоков оборудования. Прогноз уровня напряженности электрического поля внутри корпусов блоков оборудования.

2.3 Определение расчетным методом резонансных частот корпусов блоков. Экспериментальная оценка степени электромагнитной герметичности корпусов блоков. Оценка соответствия эффективности экранирования корпуса рассчитанным значениям.

2.4 Испытание устойчивости оборудования к действию электромагнитного поля с напряженностью (10 ± 0,5) В/м при открытых панелях всех корпусов блоков.

3 Реализация методики

3.1 Перечень определяемых показателей.

3.1.1 Работоспособность оборудования в соответствии с установленной для него категорией функционирования при проведении испытаний по пункту 2.1.

3.1.2 Коэффициент экранирования корпуса каждого блока в зависимости от частоты воздействующего электромагнитного поля по пункту 2.2.

3.1.3 Степень электромагнитной герметичности типового образца корпуса блока по пункту 2.3 данной.

3.1.4 Работоспособность оборудования в соответствии с установленной для него категорией функционирования при проведении испытаний по пункту 2.4.

3.2 Номинальные значения показателей.

Показатели по п.п. 3.1.1 и 3.1.4 имеют критерий «выдержал - не выдержал» в соответствии с установленной категорией функционирования.

Показатель по п. 3.1.2 – коэффициент экранирования $S = E_i / E_0$ во всем частотном диапазоне должен быть не более 10 / E_0 (E_0 – напряженность воздействующего электрического поля, заданная [2]; E_i – напряженность поля внутри корпуса-экрана; 10 В/м – напряженность поля при испытаниях п. 2.4).

Показатель по п.3.1.3 – коэффициент экранирования S на частоте основного (первого) резонанса корпуса должен быть не более 10 / E₀.

3.3 Оборудование для определения каждого показателя.

3.3.1 Работоспособность оборудования при воздействии электрического поля напряженностью 50 В/м (по п. 2.1) и 10 В/м (по п. 2.4) в диапазоне частот от 80 МГц до 3 ГГц может определяться в испытательной камере TESEQ GTEM 1500 (рис. 1). Напряжение, подаваемое на вход испытательной камеры, формируется задающим генератором R&S[®]SMC100A и усилителем мощности BONN BLWA 0830-100/80D. Испытательная камера аттестована на частотный диапазон от 0 Гц до 18 ГГц. Генератор работает в полосе частот от 10 кГЦ до 3,2 ГГц, а усилитель в полосе частот от 80 МГц до 3,0 ГГц. Мощность усилителя 100/80 Вт, что обеспечивает возможность получения поля с напряженностью до 50 В/м в рабочем объеме камеры в диапазоне частот от 80 МГц до 3,0 ГГц. Для измерения уровня электрического поля используется Измерительный зонд электрического поля FL7006Kit (рис. 2) и тестовый приемник R&S[®]ESCI (рис. 3).

3.3.2 Определение коэффициента экранирования на резонансной частоте корпуса (по п. 2.3) может осуществляется с помощью оборудования, указанного выше, или альтернативного комплекта: высокочастотный генератор Agilent 9310A; анализатор спектра FSL3; излучающая антенна (рупорная или дипольная); измерительный зонд Е поля типа ИНЭП - Р.

Рисунок 1 – Общий вид испытательной камеры TESEQ GTEM 1500

3.4 Формулы расчета показателей

3.4.1 Параметры воздействий по п.2.1 и п.2.4 в процессе проведения испытаний измеряются с помощью сертифицированного автоматизированного измерительного комплекса и дополнительной обработке не подлежат.

Рисунок 2 – Измерительный зонд электрического поля FL7006Kit

Рисунок 3 – Тестовый приемник R&S®ESCI

3.4.2 Показатель по п.2.2 (коэффициент экранирования корпуса) рассчитывается:

- в диапазоне частот, удовлетворяющих квазистационарному приближению, с помощью компьютерной программы «Молния-Н» (гармонический режим) [8]. Для корпусов блоков, имеющих максимальный размер 0,3 м, квазистационарное приближение может быть использовано до частоты 300 МГц;
- для частот от 300 МГц до 18 ГГц оценка затухания осуществляется по

Рисунок 4 – Измерительный зонд Е поля типа ИНЭП - Р

Рисунок 5 – Обобщенный параметр

формуле (1) и графику (рис. 5), полученным для волнового приближения [9].

$$A = 3,34 \cdot d \left(f \cdot \mu \cdot \gamma\right)^{1/2} \tag{1}$$

где: d – толщина экрана в дюймах; f – частота, Гц; γ – относительная электропроводность (относительно меди $\gamma_{\text{мед}} = 1$); μ – относительная магнитная проницаемость (относительно проницаемости вакуума).

3.4.3 Показатель по п. 2.3 (коэффициент экранирования корпуса на резонансной частоте) определяется на основании результатов измерения напряженности (E₀) воздействующего электрического поля и поля (E_i) внутри корпуса в одной и той же точке пространства. Значения напряженности Е (дБ·мкВ/м) рассчитывается по показаниям анализатора спектра по формуле:

 $E = U_{\mu \Pi} + K_{a}, \qquad (2)$

где U_{un} – показания измерительного приемника FSL3, дБ; K_a – коэффициент калибровки измерительной антенны, дБ.

Выводы

1 Методика испытаний основана на использовании расчетных и экспериментальных методов, с учетом рекомендаций, изложенных в нормативном документе КТ 160D (раздел 20) [2].

2 Экспериментальный метод по п.2.1 позволяет определить фактический уровень устойчивости оборудования к воздействию радиочастотного поля напряженностью 50 В/м в частотном диапазоне от 80 МГц до 3 ГГц. (Параметры воздействующего поля ограничены возможностями имеющегося в наличии испытательного оборудования).

3 Расчетные методы по п. 2.2 позволяют оценить защитные свойства корпусов блоков в предположении, что между элементами корпусов обеспечен идеальный гальванический контакт.

4 Экспериментальный метод по п.2.3 позволяет определить степень электромагнитной герметичности типового корпуса блока, обеспечиваемую принятыми техническими решениями. В случае, когда корпус блока является герметичным, результаты расчетной оценки, полученные по п.2.2 могут быть использованы для прогноза устойчивости системы к действию электромагнитных полей напряженностью поля, например, $E_{\rm T} = 100$ В/м в частотном диапазоне до 18 ГГц. Как правило, уровень электромагнитного поля, проникающего внутрь такого корпуса, значительно ниже 0,01 уровня воздействующего поля, и его дестабилизирующее действие пренебрежимо мало. В этом случае, напряженность испытательного поля $E_{\rm исп}$ для испытаний по п.2.4 устанавливается равной (10 +1) В/м.

5 Экспериментальный метод по п.2.4 позволяет определить восприимчивость электронного оборудования без корпуса к полям излучения по методике раздела 3.3.1, но при напряженности испытательного поля E_{исп}<E_т. Где: E_т – соответствующая требованиям [2] напряженность поля. В рассматриваемом случае $E_{T} = 100$ В/м. Величина $E_{исп}$ определяется на этапе 2.3, однако не может быть менее 10 В/м. Для удобства проведения испытаний, весь частотный диапазон от 80 МГц до 3 ГГц разбивают на два поддиапазона: 80 МГц - 1 ГГц; 1-3 ГГц; Оценку восприимчивости оборудования без корпуса к полям излучения выполняют последовательно для каждого поддиапазона; если хотя бы на одной частоте оборудование восприимчиво к полям излучения, то весь поддиапазон считают восприимчивым к помехам.

После проведения этого испытания, в каждом поддиапазоне возможно два результата:

- электронное оборудование не восприимчиво к помехам излучения при напряженности испытательного поля Е_{исп}, В этом случае испытания БО на восприимчивость в данном поддиапазоне заканчивают с констатацией положительного результата;
- электронное оборудование, на отдельных частотах і-го поддиапазона восприимчиво к помехам излучения. В этом случае испытания БО по восприимчивости продолжают и определяют ту минимальную (пороговую) напряженность поля Е_{мин}, на которой обеспечиваются заданные параметры качества функционирования БО внутри всего поддиапазона.

В результате получаем ряд из (j) частотных поддиапазонов с пороговым значением восприимчивости более или равным $E_{исп}$ и ряд из (i) частотных поддиапазонов с пороговыми значениями $E_{мин}(f_i)$.

Результаты испытаний оборудования по пп. 2.1 и 2.4 считаются положительными, если в процессе испытаний не было ни одного случая отказа работоспособности изделия сверх установленного критерия функционирования.

Список литературы: 1. ГОСТ 30585-98. Совместимость технических средств электромагнитная. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний. 2. Квалификационные требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 20.0 Радиочастотная восприимчивость. 3. Кравченко В.И., Колиушко Г.М., Князев В.В. Возможности испытательных полигонов Украины по реализации новых требований к параметрам мощных электромагнитных помех // Вестник НТУ «ХПИ». – № 7. – 2002. – С. 15-18. 4. Уайт Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи: Пер. с англ. / Вып. 3 / Под ред. А.Д. Князева. – М.: Сов радио, 1979. – 464 с. 5. Каден Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи / Пер. с нем. В.М. Лаврова. - М.-Л.: ГЭИ, 1957. -327 с. 6. Шваб А.Й. Электромагнитная совместимость. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 423 с. 7. Князев В.В., Скобликов А.Ю. Метод диагностики электромагнитной герметичности электромагнитных экранов // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил «Системи обробки інформації». - Вип. 6(96) Метрологія та вимірювальна техніка. - 2011. - С. 123-128. 8. Компьютерная программа для расчета результатов проникновения магнитного поля в металлический корпус объекта «Молния-Н», свидетельство о регистрации авторского права №35382 от 14.10.2010 r. 9. Ott Henry W. Electromagnetic Compatibility Engineering. Wiley & Sons Inc., 2009, 862p.

Поступила в редколлегию 12.10.2011

Д.Г.КОЛИУШКО, канд. техн. наук, ст. науч.сотр., НТУ «ХПИ»; **А.А.ПЕТКОВ**, канд. техн. наук, ст. науч.сотр., НТУ «ХПИ»

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОРАЖЕНИЯ ОДИНОЧНОГО СТЕРЖНЯ РАЗРЯДОМ МОЛНИИ

У роботі запропонована статистична модель розряду блискавки на вертикальний стрижень. Виконано перевірку адекватності моделі експериментальним даним.

In work the statistical model of the lightning stroke in a vertical rod is offered. Model verification to experimental data is executed.

В работе предложена статистическая модель разряда молнии на вертикальный стержень. Выполнена проверка адекватности модели экспериментальным данным.

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. В [1] и [2] приведены экспериментальные данные по поражению объекта-стержня, расположенного в системе электродов стержень-плоскость при использовании импульсов напряжения положительной полярности с длиной фронта 3000 мкс. В частности, при высоте подвески электрода-стержня над плоскостью H = 10 м и высоте объекта-стержня h = 2 м вероятность попадании разряда в объект-стержень при их соосном расположении составляла 0,62.

В [2] приведены также экспериментальные данные по изменению вероятности поражения объекта-стержня при изменении высоты подвески электрода-стержня в интервале H =2,5 – 15 м при постоянном отношении H/h =10. Данные показывают, что с увеличением H вероятность поражения объектастержня уменьшается.

Фотографии разрядов, приведенные в [1, 2] показывают также, что реально однократное поражение объекта-стержня является результатом случайного ступенчатого движения разряда молнии.

Представленная в рассмотренных материалах база экспериментальных данных позволяет производить некоторые количественные и качественные

оценки процесса поражения объекта-стержня разрядом молнии.

В [3] рассмотрена статистическая модель поражения бесконечного прямолинейного проводника разрядом молнии, базирующаяся на задании направления движения разряда углом движения. При этом в силу симметрии рассмотренной задачи, полученные результаты могут быть использованы при анализе распределения вероятности поражения отдельных участков плоскости.

Как показывает проведенный анализ, в настоящее время, как случайное направление движения, так и конечный результат (факт поражения объектастержня) не имеют математического описания, которое, при условии адекватности модели реальным данным, позволит существенно снизить объем экспериментальных исследований, а, следовательно, и материальные затраты.

Целью настоящей работы является построение статистической модели разряда молнии на объект-стержень, расположенный на бесконечном прямолинейном проводнике.

Материалы и результаты исследований. Рассмотрим двухступенчатую модель разряда, базирующейся на модели, предложенной в [3] (рис. 1). Разряд из точки 1 двигается параллельно оси ОХ в случайную точку 2, равномерно распределенную в интервале ($-\Delta X$, $+\Delta X$). Из точки 2 разряд двигается по направлению угла θ , случайно распределенном в интервале ($-\pi/2$, $\pi/2$). Траектория разряда представляет собой прямую линию. Если разряд, двигающийся из точки 2 и имеющий дистанцию поражения R, достигает или пересекает объект-стержень или бесконечную прямую линию, то фиксируется поражение объекта-стержня либо прямой линии.

Рисунок 1 – Схема двухступенчатой модели разряда

Предложенная модель отражает три существенных аспекта в поведении разряда молнии: ступенчатость движения разряда, отклонение разряда от оси разрядного промежутка и случайность значений угла движения поражающего разряда θ. Использование модели позволяет дать интегральную оценку процесса поражения объекта-стержня в виде вероятности поражения P_{ст}.

В качестве дистанции поражения R в модели принимается величина $R = H + \Delta R$, (1)

где ΔR – параметр дистанции поражения.

Таким образом, предложенная модель имеет три параметра: ΔX , ΔR и вид закона распределения угла движения θ . Выбором указанных параметров можно найти соответствие экспериментальным данным по величине вероятности поражения объекта-стержня, под которой понимается отношение

$$P_{\rm cr} = N_{\rm cr} / N, \qquad (2)$$

где N_{ст} – число поражений стержня; N – суммарное число поражений объектастержня и бесконечной прямой линии.

Рассмотрим вариант, когда угол θ имеет равномерное распределение. Исследуем изменение вероятности поражения стержня в зависимости от параметра модели ΔX . Исходя из предварительных расчетов принято $\Delta R = 1 \cdot 10^{-6}$ м.

На рис. 2 приведен график изменения вероятности поражения стержня в зависимости от величины полуинтервала ΔX при высоте начала движения разряда H = 10 м и высоте объекта-стержня h = 2 м. При данных геометрических размерах вероятность поражения стержня в [1, 2] экспериментально оценена как P_{ct} = 62 %.

Из графика, приведенного на рис. 2, видно, что значение $P_{ct} = 62 \%$ достигается при двух значениях длины полуинтервала $\Delta X = 0,12$ м и $\Delta X = 23,4$ м. Исходя из фотографий разряда, приведенных в [1, 2], в качестве значения параметра модели целесообразно принять $\Delta X = 0,12$ м, как вариант, более достоверно отражающий реальные процессы.

На рис. 3 и рис. 4 показаны плотности распределения вероятностей поражения бесконечной прямой p(x) и объекта-стержня q(x), полученные в результате имитационного моделирования [4]. Общее количество случайных реализаций при моделировании составило: N = $7 \cdot 10^5$ при $\Delta X = 0,12$ м и N = $2 \cdot 10^5$ при $\Delta X = 23,4$ м.

Рисунок 3 – Плотность распределения вероятности поражения при $\Delta X = 0,12$ м: *a* – бесконечной прямой; *б* – объекта-стержня

Рисунок 4 – Плотность распределения вероятности поражения при $\Delta X = 23,4$ м: *a* – бесконечной прямой; *б* – объекта-стержня

С использованием данных, приведенных на рис. 3 и рис. 4 определялась вероятность поражения объекта-стержня.

В качестве второго шага проверки адекватности предложенной модели была рассчитана поражаемость стержня и проведено сравнение с данными, приведенными в [2] при H/h = 10. На рис. 5 приведены данные изменения отношения

$$\Psi = P_{\rm cr}(H)/P_{\rm cr}(H_0), \qquad (3)$$

где *H*₀ = 2,5 м.

Как видно из рис. 5, при изменении $\Delta X = 0.05 - 0.12$ м расчетные данные располагаются достаточно близко к экспериментальным данным, полученными при использовании импульсов напряжения положительной полярности с

длиной фронта 3000 мкс. При $\Delta X = 0,05$ м максимальное относительное отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 14 %, при $\Delta X = 0,06$ м – 20 %, при $\Delta X = 0,12$ м – 40 %.

Выводы

1. Предложена двухмерная модель разряда молнии на сложный проводник, состоящий из прямолинейного бесконечного проводника, на котором установлен объект-стержень.

2. Результаты расчетов, полученные с использованием предложенной модели, с достаточной точностью (не более 14%) совпадают с известными экспериментальными данными, полученными при использовании импульсов напряжения положительной полярности с длиной фронта 3000 мкс.

Приведенные материалы могут служить базой для построения более сложных моделей, учитывающих различные физические явления при разряде молнии.

Список источников информации: 1. Об ориентировке канала длинной искры / Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, Э.М. Базелян, Е.С. Садыхова // Электричество. – 1973. – № 3. – С. 63-66. 2. 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. 3. Колиушко Д.Г. Статистическая двумерная модель разряда молнии на бесконечный прямолинейный проводник / Д.Г. Колиушко, А.А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – № 16. – С. 118-126. 4. Ермаков С.М. Статистическое моделирование / С.М. Ермаков, Г.А. Михайлов. – М.: Наука, 1982. – 296 с.

Поступила в редколлегию 20.08.2011
М.Ф.ЛОГВИНЕНКО, канд. техн. наук, доцент ХНУВС, Харків; *О.В.КАСІЛОВ*, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПІ», Харків; *В.В.ШЕВЦОВА*, ст. викладач НТУ «ХПІ», Харків

АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОТОКОЛУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З НАКОПИЧЕННЯМ ТА КВАЗІАДРЕСНИМ ПЕРЕПИТОМ

В статті розглядаються системи передачі даних з адресним та квазіадресним перепитом. Протокол з квазіадресним перепитом досліджується у двох модифікаціях з накопиченням та без накопичення правильно прийнятих блоків. Для систем передачі даних з накопиченням та квазіадресним перепитом виводиться вираз для середньої відносної швидкості. Проведено порівняльний аналіз протоколів за критерієм середньої відносної швидкості.

Data transmission systems with address and quasiaddress decision feedback are considered in the article. The quasiaddress decision feedback protocol is researched in two modifications with and without accumulation of correctly received blocks. Average relative speed formula is deduced for data transmission systems with accumulative quasiaddress decision feedback. Protocols are analyzed by the criterion of average relative speed.

В статье рассматриваются системы передачи данных с адресным и квазиадресным переспрашиванием. Протокол с квазиадресным переспрашиванием исследуется в двух модификациях с накоплением и без накопления правильно принятых блоков. Для систем передачи данных с накоплением и квазиадресным переспрашиванием выводится выражение для средней относительной скорости. Проведен сравнительный анализ протоколов за критерием средней относительной скорости.

Вступ. На теперішній час в теорії передачі цифрової інформації проаналізована ефективність багатьох протоколів передачі даних зі зворотним вирішальним зв'язком та використанням блокових (k+r, k)-кодів в режимі виявлення завад, короткий огляд яких наведено у [1]. При цьому показано, що за критерієм максимуму середньої відносної швидкості найбільш ефективним є протокол з адресним перепитом спотворених завадами блоків. Протокол з так званим квазіадресним перепитом [1] за цим критерієм поступається адресному, але за критерієм часу доставки коротких повідомлень даний протокол може бути ефективнішим. Крім цього, даний протокол недостатньо аналізувався по причині аналітичних складнощів при визначенні середньої відносної швидкості. Для одного з імовірнісних розподілень частково протокол аналізувався у [2, 3]. Однак методики повного аналізу та порівняння даного протоколу з іншими поки ще не існує. Таким чином, об'єкт даного дослідження – це протоколи роботи систем захисту інформації від завад з адресним та квазіадресним перепитом кодових блоків. Предмет дослідження – методика порівняльного аналізу різновидів таких протоколів за критерієм середньої відносної швидкості та визначення потенційних та реальних можливостей цих протоколів. Метою даної роботи є порівняльний аналіз систем передачі даних з адресним та квазіадресним перепитом даних. Для досягнення мети необхідно

вирішення задач:

- 1. Аналіз особливостей функціонування різних модифікацій протоколів.
- 2. Визначення виразів для середньої відносної швидкості.
- 3. Порівняння потенційних можливостей протоколів.
- 4. Порівняння протоколів з фіксованими параметрами.

1 Протоколи й методики їхньої оптимізації.

Протокол з адресним перепитом спотворених блоків. Протокол розглядається в [4]. Його середня відносна швидкість при використанні (*k*+*r*, *k*) блокового коду в режимі виявлення завад визначається наступним чином:

$$R_{A} = \frac{k}{k+r} (1-p_{0})^{k+r}, \qquad (1)$$

де p_0 – ймовірність виникнення незалежних по бітах завад для деякого конкретного стану каналу

Найбільш складним елементом цього протоколу є відновлення порядку проходження блоків після завад у накопичувані адресата даних. Цей алгоритм наведений в [6].

Протокол з квазіадресним перепитом без накопичення правильних блоків. У системі передачі даних із квазіадресним перепитом передача здійснюється пакетами по *N* кодових блоків. Передавач системи при прийомі сигналу «запит» на *j*-тий блок даних повторює цей блок і всі наступні блоки вже переданого пакета, а місця, що залишилися, доповнюються новими блоками.

При організації дуплексного обміну в прийомних і передавальних трактах апаратури передачі даних (АПД) організуються канальні накопичувачі даних. На передачі із цих накопичувачів дані передаються в дискретний канал (ДК), а на прийомі – із ДК записуються в ці накопичувачі. Параметр *N* вибирається, як правило, рівним ємності канального накопичувача системи передачі даних і для дуплексної системи повинен задовольняти нерівності[1]:.

$$N \ge 2 \left(\frac{L_m \cdot B}{C \cdot n} + \frac{T_z \cdot B}{n} \right) + 4, \qquad (2)$$

де L_m – максимальна дальність дуплексного зв'язку між двома станціями, км; C – швидкість поширення сигналу в лінії зв'язку, км/с; B – швидкість модуляції, біт/с; T_z – затримки сигналу в трактах АПД, с.; n = k + r – довжина кодового блоку, біт.

Дане співвідношення записане з умови, що час обробки одного блоку даних не перевищує часу прийому блоку, тобто величину n/B. Для можливості реалізації дуплексної системи ця умова є обов'язковим. Параметр N – один з параметрів, від якого залежить ефективність системи. У випадку реалізації двосторонньої полудуплексної системи (такий режим часто необхідний у радіосистемах рухомого радіозв'язку) параметр N вибирається з кілька інших

міркувань [5].

Середня відносна швидкість системи з квазіадесним перепитом [2]:

$$R_{KA} = \frac{k}{k+r} \cdot \frac{P_{nn}(1-P_{nn}^{N})}{N(1-P_{nn})},$$
(3)

де *Р_{пп}* – ймовірність правильного прийому блоку.

Для моделі каналу з незалежними по бітах завадами та роботи системи передач даних в режимі виявлення завад ймовірність правильного прийому блоку можна прийняти $P_{nn} = (1 - p_0)^{k+r}$.

Протокол з квазіадресним перепитом та накопиченням правильно прийнятих блоків. У цій модифікації протоколу передавач працює також, як і попередньому випадку, а приймач накопичує безпомилково прийняті блоки й передає сигнал «запит» на перший помилковий блок тільки тоді, коли він не міститься в накопичених блоках.

Середню відносну швидкість системи із квазіадресним перепитом та накопиченням правильно прийнятих блоків будемо шукати по формулі:

$$R_{AKA} = \frac{k-s}{k+r} \cdot \frac{M[\xi_{\mu}]}{N}, \qquad (4)$$

де *s* – число службових розрядів, що використовуються для реалізації алгоритму перепиту, серед *k* інформаційних (розряди для нумерації блоків і сигналів «запит» й «підтвердження»); $M[\xi_{\mu}]$ – математичне сподівання випадкової величини ξ_{μ} – числа нових блоків з *N*, які передаються в одному циклі в стаціонарному стані роботи системи.

Побудуємо імовірнісний розподіл випадкової величини ξ_{H} :

$$P[\xi_{n} = j] = \begin{cases} 1 - P_{nn}, j = 0 \\ P_{nn}(1 - P_{1}), j = 1 \\ P_{nn} P_{1}(1 - P_{2}), j = 2 \\ \vdots \\ P_{nn} P_{1} P_{2} \cdots P_{N-2}(1 - P_{N-1}), j = N - 1 \\ P_{nn} P_{1} P_{2} \cdots P_{N-2} P_{N-1}, j = N \end{cases}$$
(5)

де $P_1, P_2, \ldots P_{N-1}$ – ймовірності правильного прийому 1-го, 2-го, … (N-1)-го блоків у пакеті (нумерація з нуля) з урахуванням накопичення правильно прийнятих блоків.

Легко переконатися, що (5) імовірнісний простір:

$$\sum_{m=0}^{N} P[\xi_{n} = j] = 1.$$
(6)

Позначимо ймовірності накопичення правильно прийнятих блоків у приймачі після *i*-го циклу передачі P'_i , де j = 1, 2, ... (N-1) – номер блоку в пакеті.

Тоді ймовірність прийому блоку на (*i*+1)-ом циклі передачі буде дорів-

нювати:

$$P_{j} = 1 - (1 - P'_{j}) \cdot (1 - P_{nn}) \quad \text{afo} \quad P'_{j} = \frac{P_{j}}{1 - P_{nn}} - \frac{P_{nn}}{1 - P_{nn}} \,. \tag{7}$$

Введемо наступні гіпотези H_0 – був перепитаний 0-ий блок (було передано 0 нових блоків), H_1 – був перепитаний 1-ий блок (переданий 1 новий блок), ... H_N – був переданий сигнал «підтвердження» (передане N нових блоків). Таким чином, імовірності гіпотез дорівнюють ймовірностям (5):

$$P(H_j) = P[\xi_{\mu} = j].$$
(8)

По формулі повної ймовірності запишемо вирази для P'_{j} . Міркувати будемо так: якщо здійснилася гіпотеза H_0 , то пакет був повністю повторений й імовірності зберігання будуть дорівнюють ймовірностям прийому. Якщо здійснилася гіпотеза H_1 , то початковий блок пакета був переданий у приймач, накопичувач був зсунутий на один блок нагору, і ймовірність зберігання 1-го блоку буде дорівнює ймовірності прийому 2-го блоку й т.д.:

$$P'_{1} = P(H_{0})P_{1} + P(H_{1})P_{2} + P(H_{2})P_{3} + \dots + P(H_{N-2})P_{N-1}$$

$$P'_{2} = P(H_{0})P_{2} + P(H_{1})P_{3} + \dots + P(H_{N-3})P_{N-2}$$

$$\vdots$$

$$P'_{N-2} = P(H_{0})P_{N-2} + P(H_{1})P_{N-1}$$

$$P'_{N-1} = P(H_{0})P_{N-1}.$$
(9)

Підставивши вирази для $P(H_m)$ і P'_j , одержимо систему з (N-1) нелінійного рівняння для визначення ймовірностей правильного прийому 1-го, 2-го, … (N-1)-го блоків у пакеті $P_1, P_2, \dots P_{N-1}$ з урахуванням накопичення правильно прийнятих блоків:

$$\left\{ \frac{P_{1}}{1-P_{nn}} - \frac{P_{nn}}{1-P_{nn}} = (1-P_{nn})P_{1} + P_{nn}(1-P_{1})P_{2} + \dots + P_{nn}P_{1}P_{2} \dots (1-P_{N-2})P_{N-1} \\
\frac{P_{2}}{1-P_{nn}} - \frac{P_{nn}}{1-P_{nn}} = (1-P_{nn})P_{2} + P_{nn}(1-P_{1})P_{3} + \dots + P_{nn}P_{1}P_{2} \dots (1-P_{N-3})P_{N-1} \\
\vdots \qquad (10)$$

$$\frac{P_{N-2}}{1-P_{nn}} - \frac{P_{nn}}{1-P_{nn}} = (1-P_{nn})P_{N-2} + P_{nn}(1-P_{1})P_{N-1} \\
\frac{P_{N-1}}{1-P_{nn}} - \frac{P_{nn}}{1-P_{nn}} = (1-P_{nn})P_{N-1}$$

Систему пропонується вирішувати чисельно. Для рішення системи рівнянь як початкові значення візьмемо *P*_{nn}:

$$P_1^{\ 0} = P_2^{\ 0} = \dots = P_{N-1}^{\ 0} = P_{nn}.$$
(11)

Підставивши початкові значення в праву частину виразів (10), обчислимо значення ймовірностей на першій ітерації. Продовжуючи обчислення аналогічним образом, зупинимося, коли різниця між значеннями шуканих ймовірностей на попередній і наступній ітерації буде не більше заданої точності.

Використовуючи (5), одержимо вираз для математичного сподівання:

$$M[\xi_{\scriptscriptstyle H}] = \sum_{j=0}^{N} j \cdot P[\xi_{\scriptscriptstyle H} = j].$$

Адекватність системи рівнянь (10) була перевірена шляхом моделювання в середовищі MatLab.

2 Приклади розрахунків. Маючи вирази для середньої відносної швидкості систем, проведемо порівняльний аналіз цих систем, при цьому теоретичний інтерес представляє потенційна швидкість, коли в кожній точці p_0 обчислюються оптимальні значення параметрів кодів і відповідне значення середньої відносної швидкості. Порівняння потенційних швидкостей для адресного, квазіадресного без накопичення та квазіадресного з накопиченням перепиту при N = 12 наведено на рис. 1.



Рисунок 1 – Графік потенційних середніх відносних швидкостей розглянутих протоколів для *r* = 16 та *N* = 12

На рис. 2 зображені графіки потенційних швидкостей для квазіадресного перепиту з накопиченням для r = 16 при N = 8, 12, 18, 32. 3 рис. 2 бачимо, що зі збільшенням параметру N середня відносна швидкість системи передачі даних падає.

Практичний інтерес представляє порівняння значень середньої відносної швидкості в діапазоні зміни якості дискретного каналу, але при фіксованих

параметрах блоку, що вибираються оптимальними в середній точці якості дискретного каналу.



Рисунок 2 – Графік потенційних середніх відносних швидкостей для квазіадресного перепиту з накопиченням



Рисунок 3 – Графік середніх відносних швидкостей для каналів КХ_{мп} та КХ_{вп}

Розрахунки для каналів радіозв'язку декаметрового діапазону малої потужності випромінювання (КХ_{мп}) та великої потужності випромінювання (КХ_{вп}) при N = 12 представлені на рис. 3. Канал КХ_{мп} з середньою ймовірністю завади на біт $p_{cp} = 1,6 \cdot 10^{-2}$ є каналом погіршеної якості. Канал КХ_{вп} має $p_{\rm cp} = 3.0 \cdot 10^{-3}$ та є каналом середньої якості.

За критерієм максимуму середньої відносної швидкості ефективнішим є протокол з адресним перепитом, але для каналів з середньою ймовірністю помилки на біт не більш ніж 10⁻⁴ протокол з адресним перепитом дає не дуже великий виграш, проте ускладнює структуру встаткування й алгоритму роботи. Також квазіадресний протокол з накопиченням дає виграш порівняно з протоколом без накопичення.

Оптимальні значення інформаційної частини кодового блоку k для протоколів з адресним, квазіадресним без накопичення та квазіадресним з накопиченням перепитом для N = 12 представлені в табл. Оптимальна довжина кодового блоку для адресного та квазіадресного перепиту суттєво відрізняється.

<i>p</i> ₀	k _A	k _{AKA}	k _{KA}				
r = 8							
1,00E-01	6	5	4				
5,00E-02	9	8	6				
1,00E-02	24	17	10				
5,00E-03	36	22	14				
1,00E-03	86	41	33				
1,00E-04	279	117	108				
1,00E-05	890	356	348				
1,00E-06	2824	1115	1107				
	<i>r</i> =	16					
1,00E-01	7	7	6				
5,00E-02	11	11	9				
1,00E-02	33	25	17				
5,00E-03	49	35	23				
1,00E-03	119	69	55				
1,00E-04	392	197	183				
1,00E-05	1257	604	590				
1,00E-06	3992	1894	1880				
	<i>r</i> =	32					
1,00E-01	8	8	8				
5,00E-02	14	13	13				
1,00E-02	43	35	25				
5,00E-03	65	50	30				
1,00E-03	164	95	63				
1,00E-04	550	246	212				
1,00E-05	1773	723	691				
1,00E-06	5641	2240	2207				

Оптимальні значення інформаційної частини кодового блоку

Висновки

1. На каналах погіршеної якості квазіадресний протокол з накопиченням правильно прийнятих блоків дає виграш близько 30 % у порівнянні з протоколом без накопичення.

2. На каналах погіршеної якості необхідно ретельно підбирати довжину кодового блоку.

3. В системах передачі даних з квазіадресним перепитом ємність канального накопичувача суттєво впливає на середню відносну швидкість.

Список літератури: 1. Логвиненко Н. Ф. Анализ эффективности систем передачи данных с решающей обратной связью и квазиадресным переспросом [Текст] / Н. Ф. Логвиненко // Сб. научн. трудов 3-го Межлународного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Со-(MPΦ'2008)». - 2008. - T. 6: ЭМС. - C. 31-34. стояние и перспективы развития 2. Логвиненко М. Ф. Ефективність адаптації довжини кодових блоків до якості дискретних каналів. [Текст] / М. Ф. Логвиненко, В. Є. Серенко // Радиотехника. – 2005. – вып. 140. – с. 140-146. 3. Логвиненко М. Ф. Порівняльний аналіз ефективності систем захисту даних від завад з адресним та квазіадресним перепитом [Текст] / Н. Ф. Логвиненко, В. В. Шевиова // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: ХНУРЕ, 2010. – Т. 9 № 2. – С. 285-289. 4. Петрович В. И. Алгоритм с накоплением и адресным переспросом для обмена данными по каналам ухудшенного качества [Текст]/ В. И. Петрович, Н. Ф. Логвиненко, Ю. П. Сухоруков // Техника средств связи. Сер. ТПС. – 1984. – Вып. 8. – С. 28-37. 5. Логвиненко Н. Ф. Полудуплексный обмен данными по каналам радиосвязи // Техника средств связи. Сер. ТПС. – 1991. – С. 45-51. 6. А.с. 809615 СССР, МКИ⁵ Н 04 L 1/16 Устройство для приема дискретной информации в системах с решающей обратно связью / Н. Ф. Логвиненко, В. И. Петрович, В. Д. Русаков [та ін.]. – № 4017819/24-09; Заявл. 06.02.86; Опубл. 07.05.89. Бюл. № 17. – С. 245.

Надійшла до редколегії 27.10.2011

УДК 681.324

В.Я.ПЕВНЕВ, канд. техн. наук, доцент ХНУВД, Харьков; *М.В.ЦУРАНОВ*, преподаватель, ХНУВД, Харьков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ГРУППОВЫХ ОШИБОК В КАНАЛЕ СВЯЗИ

У статті проведено аналіз основних математичних моделей групових помилок у каналах зв'язку. На основі аналізу здійснена комп'ютерна реалізація моделей помилок і проведений експеримент залежності помилок від довжини каналу зв'язку.

The article analyzes the main group of mathematical models of errors in communication channels. Based on the analysis performed computer implementation of error models and an experiment depending on the length of error channel.

В статье проведен анализ основных математических моделей групповых ошибок в каналах связи. На основе анализа осуществлена компьютерная реализация моделей ошибок и проведен эксперимент зависимости ошибок от длины канала связи. Постановка задачи. Современные технологии передачи информации позволяют осуществлять обмен данными на большие расстояния, создавать глобальные и корпоративные сети. В зависимости от условия реализации и эксплуатации таких сетей передача данных в них подвергается влиянию различного рода помех. Исходя из задач, возникающих при проектировании этих систем, строятся различные математические модели ошибок в каналах связи.

Одной из первых моделей ошибок в канале связи является модель двоичного симметричного канала связи с независимыми ошибками [1]. Единственным параметром канала, необходимым для определения всех характеристик системы является вероятность искажения символа p_{out} . Данная модель отличается своей простотой, но, как показали исследования возникновения ошибок в реальных каналах, реальная статистика ошибок не удовлетворяет столь простой модели.

Значительная группа разработанных моделей использует чисто математический подход к описанию потока ошибок, а именно, предполагается взаимонезависимость длин интервалов между одиночными ошибками и подбирается такое распределение длин интервалов, которое достаточно хорошо согласуется с опытными данными. Таковы модели Бергера-Манделброта [2], Брусиловского [1], Аксенова-Воронина [5]. Во всех этих моделях игнорируется физическая сторона процессов, происходящих в каналах связи, механизм образования групповых ошибок выражен неявно.

Более близкие к реальной работе канала связи результаты можно получить, если строить математическую модель потока ошибок, оперируя математическими понятиями, близкими к физическим явлениям, происходящим в канале связи. Существует ряд моделей, которые в определенной степени учитывают физику явлений, приводящих к искажению передаваемой информации. Наиболее известные среди них модели Гильберта [3], Эллиота-Гильберта [4], Фричмана-Свободы [4], Флойлиха-Беннета [5], Попова-Турина [2].

Модели Гильберта, Эллиота-Гильберта, Фричмана-Свободы оперируют понятиями «состояние канала», в котором задаются условные вероятности появления ошибок. Переходы из одного состояния в другое описываются с помощью марковских цепей. Модели Гильберта, Эллиота-Гильберта используют простую марковскую цепь с двумя состояниями и отличаются лишь тем, что в модели Эллиота-Гильберта в «хорошем» состоянии канала задается конечная, ненулевая вероятность ошибки [3]. В модели Фричмана-Свободы число состояний произвольное, что позволяет более точно описать реальный канал. Согласно модели Флойлиха-Беннета поток ошибок состоит из пакетов, возникающих независимо друг от друга с некоторой постоянной вероятностью. Внутри пакета ошибки также независимы, распределение длин пакетов произвольно, но вероятность появления пакета ошибок определенной длины не зависит от длин других пакетов. Обобщением модели Фройлиха -Беннета является модель Попова-Турина, которая предполагает существование в канале независимо возникающих групп ошибок, внутренняя структура которых является зависимой. Любая позиция в пакете ошибок может стать началом новой цепочки пакетов ошибок с вероятностью, не зависящей от того, на каких других позициях возникли цепочки. Распределение длин цепочек подчиняется геометрическому закону. Внутри цепочек независимо появляются пакеты ошибок, длины которых распределены по полигеометрическому закону, а внутри пакетов задается условная вероятность появления ошибок.

Следует учесть, что рассмотренные модели ошибок могут быть использованы лишь на сравнительно коротких интервалах времени работы канала связи. Практически во всех реальных каналах при длительных наблюдениях можно заметить значительную неравномерность распределения ошибок во времени [6]. В часы наиболее напряженной работы возрастает и уровень групповых помех, перегружаются источники питания, увеличивается число коммутаций аппаратуры, что ведет к росту числа ошибок.

Данные факторы приводят к тому, что поток ошибок становится нестационарным. Более близкой к реальности окажется модель, отражающая в той или иной степени указанные выше особенности каналов - модель, параметры которой будут зависеть от времени. Учитывая, что на практике необходимо формализация расчета показателей реальных телекоммуникационных систем, можно прийти в к выводу, что наиболее перспективными являются квазистационарные модели, в которых основные параметры канала связи являются переменными, зависящими от времени. В этом случае сложную модель возникновения ошибок в канале связи можно представляется в виде простой модели, параметры которой случайным образом меняются во времени. При медленном изменении параметров канала можно допустить их скачкообразность, то есть дискретность основных параметров канала. При таком подходе, единый источник ошибок распадается на несколько составляющих, которые можно поставить в соответствие дискретным составляющим. Эквивалентная схема такой модели ошибок представляена на рис. 1 [2].



Рисунок 1 – Эквивалентная схема модели ошибок

Для разложения результирующей последовательности ошибок на составляющие можно использовать различные способы, что позволяет создавать определенный резерв при выборе источников ошибок и их комбинаций. При выборе источников ошибок, который в значительной мере произволен и обусловлен лишь самыми характерными особенностями поведения канала, следует взять модель, отражающую реальное группирование ошибок в канале связи, поскольку в реальных каналах тенденция к группированию ошибок ярко выражена и может проявляться в течении первых минут работы канала. При рассмотрении реальных каналов следует отметить тот факт, что чаще всего наблюдаются периоды работы со сравнительно редкими пакетами ошибок, т.е. нормально работающая магистраль имеет малую плотность пакетов ошибок и продолжительность таких состояний наибольшая.

Целью данной работы является экспериментальное установление зависимостей возникновения невосстанавливаемых ошибок в передаваемых сообщения от его размера и модели групповых ошибок.

Разработка и проведение эксперимента. Проанализировав существующие модели ошибок, авторы пришли к выводу о наиболее точных моделях. Это модели построенные на многомерном распределении Беннета – Фройлиха. В ходе эксперимента определялись зависимости количества ошибок в сообщении от характеристик канала связи и длины сообщения. При этом предполагалось, что канал является бинарным и симметричным. Для проведения эксперимента авторы программно реализовали рассмотренные выше модели ошибок с параметрами, отвечающими показателям в реальных каналах связи. Канал связи – бинарный, симметричный.

В ходе эксперимента подсчитывалось количество блоков, в которых обнаружена хотя бы одна ошибка, вероятность появление более одной ошибки в миниблоках размерами 4 и 8 бит, количество таких миниблоков в передаваемом сообщении. Схема алгоритма проведенного эксперимента, представленна на рис. 2.

Программно были реализованы следующие модели ошибок:

- модель, построенная на многомерном распределении;
- модель Беннета Фройлиха.

При проведение эксперимента, в модели, построенном на многомерном распределении были использованы следующие параметры:

- количество состояний 4;
- вероятности перехода системы в эти состояния и, соответственно, вероятности ошибок в этих состояниях (см. табл. 1);
- вероятности перехода системы из одного состояния в другое (см. табл. 2).

Для модели Беннета-Фройлиха в ходе эксперимента были использованы следующие параметры:

- вероятность появления пакета ошибок P_{пак} = 10⁻⁴;

- вероятность ошибки внутри пакета $P_{om} = 10^{-3}$, 10^{-2} ;
- математическое ожидание длины очередного пакета $M_{Ln} = 50;$
- среднее квадратичное отклонение длины пакета $\sigma_{Ln} = 16,66.$



Рисунок 2 - Схема алгоритма

Таблица 1 – Параметры состоя-
ний модели, построенной на
многомерном распределении

№ п.п.	$P_{coc}T$	Рош
1	0,6	$10^{-4} \div 10^{-3}$
2	0,2	$10^{-3} \div 10^{-2}$
3	0,09	10 ⁻²
4	0,11	10 ⁻²

Таблица 2 – Параметры смены состояний модели, построенной на многомерном распределении

№ сост	1	2	3	4	
1	0,5	0,2	0,15	0,15	
2	0,7	0,15	0,1	0,05	
3	0,29	0,26	0,25	0,2	
4	0,4	0,25	0,2	0,15	

Эксперимент проводился на потоке блоков размером от 256 до 8192 бит с шагом 256 бит. В каждой точке исследования для каждой из моделей было проведено 1000 реализаций. Границы интервалов определялись в соответствии с вероятностями появления одиночных ошибок в существующих каналах связи. Данные каналы определяются существующими топологиями, которые используются в современных телекоммуникационных системах.

Результаты эксперимента. При обработке результатов эксперимента была обнаружена зависимость появления ошибок в сообщении от длины блока данных и выбранных моделей появления групповых ошибок в каналах связи. В ходе эксперимента определялось количество ошибок в блоке. В табл. 3 показана зависимость вероятности одиночной ошибки от размера передаваемого блока и максимальное количество ошибок, которые возникли в блоке при передаче при заданных параметрах модели. Следует отметить, что максимальное количество ошибок в блоке значительно превосходит среднее. Вероятность появления ошибки определялось как отношение общего количества ошибок к размеру блока и количества опытов

Важным результатом эксперимента стало выявления миниблоков, содержащих две и более ошибки. В качестве размера такого миниблока были выбраны последовательности размером 4 и 8 бит. Данные зависимости представлены в табл. 3.

Выводы. Представленные в работе результаты эксперимента по моделированию канала связи с использованием предложенных моделей групповых ошибок показывает возможность:

- применения способа восстановления информации при обмене данными в телекоммуникационных системах, изложенного в [7];
- использования, при работе с миниблоками указанной в работе длины, в качестве моделей возникновения ошибок – модели возникновения независимых ошибок, так как являются более «жесткими», по сравнению предложенными моделями групповых ошибок.

	Молець Бенцета-Фройдиха						Многомерное					
	Модель веннета-фроилиха								распр	еделе	ение	
_	P :	P = 0.01 $P = 0.001$				0 10		10				
ина блока (бит)	Рош	ошибок в блоке	Кол ми бло с ² ош ко	і-во ни- ков ≥1 иб- рй	Рош	ошибок в блоке	Кол ми бло с	1-во ни- жов >1 бкой	Рош	 ошибок в блоке 	Кол мин блол с > ошп ко	-во іи- ков >1 иб- рй
Дл		Макс кол.	4 бита	8 бит		Макс кол.	4 бита	8 бит		Макс кол	4 бита	8 бит
256	1,62E-03	2	0	0	2,03E-04	1	0	0	8,15E-03	9	0	0
512	7,64E-04	2	0	0	1,02E-04	2	0	0	8,38E-03	12	0	0
768	5,27E-04	2	0	0	5,47E-05	1	0	0	8,26E-03	15	0	0
8192	8,02E-05	4	0	0	9,77E-06	4	0	0	8,11E-03	96	0	3
1024	4,32E-04	2	0	0	6,15E-05	1	0	0	8,13E-03	19	0	0
1280	3,19E-04	3	0	0	4,61E-05	1	0	0	8,11E-03	23	0	1
1536	2,81E-04	3	0	0	4,04E-05	2	0	0	8,16E-03	25	0	1
1792	2,54E-04	3	0	0	3,24E-05	2	0	0	8,19E-03	30	0	2
2048	2,23E-04	3	0	0	2,54E-05	1	0	0	8,15E-03	31	0	3
2304	2,09E-04	2	0	0	2,73E-05	2	0	0	8,19E-03	33	0	3
2560	1,86E-04	3	0	0	2,46E-05	1	0	0	8,11E-03	39	1	4
2816	1,76E-04	3	0	0	1,99E-05	2	0	0	8,15E-03	39	0	2
30/2	1,57E-04	3	0	0	1,99E-05	2	0	0	8,14E-03	43	1	2
3328	1,52E-04	3	0	0	1,74E-05	1	0	0	8,16E-03	44	0	2
3584	1,4/E-04	3	0	0	1,8/E-05	2	0	0	8,12E-03	49	0	1
3840	1,37E-04	3	0	0	1,54E-05	1	0	0	8,09E-03	4/	0	2
4090	1,21E-04	2	0	0	1,93E-03	2	0	0	8,10E-03	55	0	1
4552	1,23E-04	3	0	0	1,49E-05	2	0	0	8,08E-03	53	0	0
4008	1,18E-04	4	0	0	1,45E-05	1	0	0	8,11E-03	59	0	0
5120	1,14E-04	4	0	0	1,50E-05	2	0	0	8,13E-03	65	1	3
5376	1,12E 04	3	0	0	1,74E-05	1	0	0	8 10E-03	63	0	0
5632	1,05E-04	3	0	0	1,41E-05	2	0	0	8.09E-03	66	0	1
5888	9 56E-05	3	0	0	1,36E-05	2	0	0	8 14E-03	75	0	1
6144	1.05E-04	4	1	1	1,20E-05	2	0	0	8.11E-03	70	0	0
6400	9.95E-05	3	0	0	1.30E-05	2	0	1	8.10E-03	73	1	1
6656	9,33E-05	3	0	0	9,62E-06	2	0	0	8,10E-03	77	0	2
6912	9,10E-05	4	0	0	1,07E-05	1	0	0	8,10E-03	78	0	1
7168	9,36E-05	5	0	0	1,21E-05	2	1	1	8,12E-03	85	0	0
7424	8,73E-05	5	0	1	1,29E-05	2	0	0	8,10E-03	91	0	3
7680	8,85E-05	3	0	0	1,11E-05	2	0	0	8,13E-03	85	0	4
7936	8,86E-05	4	0	0	1,05E-05	2	0	1	8,08E-03	88	0	0

Таблица 3 – Результаты эксперимента

Список литературы: 1. *Р.Фано* Передача информации. Статистическая теория связи. – М.: Мир, 1965. **2.** *Блох Э.Л., Попов О.В., Турин В.Я.* Модель источника ошибок в каналах передачи цифровой информации. – М.: Связь, 1971. **3.** *Гильберт Э.Н.* Пропускная способность канала связи с пакетными ошибками / Кибернетический сборник. – № 9. – М.: Мир, 1964. **4.** Статистика ошибок при передачи цифровой информации / Под ред. *С.И.Самойленко.* –М.: Мир, 1966. **5.** *Советов Б.Я., Стах В.М.* Построение адаптивных систем передачи информации для автоматизированного управления. – Л.: Энергоиздат, 1982. **6.** Каналы передачи данных / *Л.И.Зубовский, А.Б.Пугач, Н.Л.Беркман.* – М.: Связь, 1970. **7.** *Псвнсе В.Я.* та ін. Спосіб відновлення інформації при обміні даними у телекомунікаційних системах. – Патент на корисну модель № 26778, МПК НО4L 12/00, заяв. 23.04.07, опубл. 10.10.2007, Бюл. № 16.

Поступила в редколлегию 27.10.2011

УДК 621.391

С.И. ПРИХОДЬКО, д-р техн. наук, зав. кафедрой, УкрГАЖТ, Харьков; *Н.А. ШТОМПЕЛЬ*, канд. техн. наук, ассистент, УкрГАЖТ, Харьков

ОЦЕНКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ МЕТОДА ЧАСТОТНОГО АЛГЕБРАИЧЕСКОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ

У роботі проведене числове порівняння обчислювальної складності методів алгебраїчного декодування згорткових кодів у часовій та частотній областях, з якого випливає, що метод частотного декодування згорткових кодів на основі ШПФ Винограда доцільно використовувати для згорткових кодів з довжиною вхідного кодового обмеження $r \ge 6$.

The paper contains a numerical comparison of computational complexity methods of algebraic decoding convolutional codes in time and frequency domains from which it follows that the method of frequency decoding convolutional codes based on the Winograd's FFT advisable to use for convolutional codes with length of input code limitation $r \ge 6$.

В работе проведено числовое сравнение вычислительной сложности методов алгебраического декодирования сверточных кодов во временной и частотной областях, из которого получается, что метод частотного декодирования сверточных кодов на основе ШПФ Винограда целесообразно использовать для сверточных кодов с длиной входного кодового ограничения *r* 6.

Постановка задачи. Основными показателями эффективности методов декодирования помехоустойчивых кодов, в частности сверточных кодов, являются обеспечиваемое отношение сигнал/шум, требуемая вероятность потерь и вычислительная сложность. При заданных значениях первых двух показателей эффективности в качестве критерия эффективности выступает вычислительная сложность. Под вычислительной сложностью метода декодирования понимается число арифметических операций, выполняемых над обрабатываемыми данными или промежуточными значениями, полученными из них, на каждом этапе декодирования. Арифметическими операциями являются сложение и умножение элементов из конечного поля $GF(p^m)$. Сложность операции умножения M(n) больше сложности операции сложения A(n) (в общем случае принимается, что $M(n) = 2 \cdot A(n)$), поэтому целесообразно уменьшать количество умножений даже за счет некоторого увеличения числа сложений. Асимптотическая сложность операций умножения и сложения определяет размер задач, которые можно решить алгоритмом, реализующим заданный метод декодирования, и обозначается как O(n) [1].

	декодирования сверто швіх кодов на		пограда	
Номер	Назрание отана неколирорания	Вычислительная сложность		
этапа	Пазвание этапа декодирования	Умножения	Сложения	
1	Преобразование бесконечной дво- ичной кодовой последовательности сверточного кода в символы поля $GF(p^m)$ и разделение ее на отдель- ные части	-	-	
2	Вычисление прямого преобразова- ния Фурье с помощью БПФ Вино- града части кодовой последователь- ности сверточного кода	n log2 n	n log ₂ n	
3	Вычисление многочлена локаторов ошибок (алгоритм Берлекэмпа- Месси)	$4t^2$	$4t^2$	
4	Рекуррентное продолжение синдрома	t(n-2t)	t(n-2t)	
5	Исправление части кодовой после- довательности сверточного кода в частотной области	-	п	
6	Вычисление обратного преобразования Фурье с помощью БПФ Винограда	n log2 n	n log2 n	
7	Извлечение части информационной последовательности и ее отображение в двоичную последовательность	-	-	
	Всего	$\frac{2 n \log_2 n + 1}{1 + nt + 2t^2}$	$\frac{2 n \log_2 n +}{n t + 2t^2 + n}$	

Таблица 1 – Вычислительная сложно	сть метода частотного алгебраического
декодирования сверточных к	одов на основе БПФ Винограда

В [2] предложен метод алгебраического декодирования сверточных кодов во временной области. Для уменьшения вычислительной сложности данного метода декодирования в [3, 4] обоснован переход в частотную область за счет использования преобразования Фурье на соответствующих этапах декодирования. Из [1] известно, что для сокращения вычислительной сложности вычисления преобразования Фурье необходимо применять «быстрые» алгоритмы, например быстрое преобразование Фурье (БПФ) Винограда. В [5] данный принцип использован для уменьшения вычислительной сложности процесса декодирования сверточных кодов в частотной области. Также в [5] получены аналитические выражения для оценки вычислительной сложности методов алгебраического декодирования сверточных кодов во временной и частотной областях.

Целью статьи является проведение численного сравнения вычислительной сложности методов алгебраического декодирования сверточных кодов во временной и частотной областях.

Основная часть. Основные этапы метода алгебраического декодирования сверточных кодов в частотной области на основе БПФ Винограда, а также аналитические выражения, описывающие их вычислительную сложность, представлены в табл. 1.

В табл. 1 n – длина полного кодового ограничения сверточного кода, t – количество, исправляемых ошибок. В результате расчетов по выражениям из табл. 1 и [5] получены значения вычислительной сложности методов алгебраического декодирования сверточных кодов во временной и частотной областях в зависимости от длины кодового ограничения (табл. 2).

п	e.	0	0	Количество операций умножения				
:1/1	ЭВС в, <i>г</i>	во е, <i>п</i>	ale ale	недво	ичных	двои	чных	
Скорость, <i>R</i> =	Входное кодо ограничени	Полное кодо ограничение	Полное кодо ограничень (двоичное),	во временной области, M _B (r)	в частотной области, $M_{\rm q}(r)$	во временной области, M _B (<i>n</i>)	в частотной области, $M_{\rm q}(n)$	
1/2	2	3	6	16	15	32	30	
1/3	4	7	21	68	61	204	183	
1/4	8	15	60	280	210	1120	840	
1/5	16	31	155	1136	684	5680	3420	
1/6	32	63	378	4576	2273	27456	13638	
1/7	64	127	889	18370	7887	128590	55209	
1/8	128	255	2040	73600	28590	588800	228720	

Таблица 2 – Вычислительная сложность методов алгебраического декодирования сверточных кодов во временной и частотной областях

На рис. 1 и 2 результаты расчетов, приведенные в табл. 2, представлены соответственно в виде графиков $M_B(r)$, $M_{\rm q}(r)$ и $M_B(n)$, $M_{\rm q}(n)$.

Из анализа графиков на рис. 1 и 2 следует, что метод частотного декодирования сверточных кодов имеет существенно меньшую вычислительную сложность, чем декодирование во временной области, при длине входного кодового ограничения $r \ge 8$ (или, что эквивалентно, при длине полного кодового ограничения $n \ge 60$).



Рисунок 1 – Вычислительная сложность методов алгебраического декодирования сверточных кодов во временной и частотной областях (недвоичные операции)



Рисунок 2 – Вычислительная сложность методов алгебраического декодирования сверточных кодов во временной и частотной областях (двоичные операции)



Рисунок 3 – Вычислительная сложность методов алгебраического декодирования сверточных кодов во временной и частотной областях (*n* = 63)



Рисунок 4 – Вычислительная сложность методов алгебраического декодирования сверточных кодов во временной и частотной областях (*n* = 127)



Рисунок 5 – Вычислительная сложность методов алгебраического декодирования сверточных кодов во временной и частотной областях (*n* = 378)

В табл. 2 длина входного кодового ограничения фиксированная и удовлетворяет условию $r \approx n/2$, поэтому далее рассмотрена зависимость вычислительной сложности методов алгебраического декодирования во временной и частотной областях при фиксированной длине полного кодового ограничения и изменяемом входном кодовом ограничении. Результаты данных расчетов приведены в виде графиков $M_{\rm B}(r)$ и $M_{\rm q}(r)$ на рис. 3-5.

Из анализа графиков на рис. 3-5 следует, что метод алгебраического декодирования в частотной области имеет меньшую вычислительную сложность, чем во временной области, при следующих значениях длины входного кодового ограничения, а именно: при $n = 60 - r \ge 6$; при $n = 155 - r \ge 8$; при $n = 378 - r \ge 11$. Аналогично можно показать, что это также справедливо при $n = 889 - r \ge 13$ и $n = 2040 - r \ge 16$.

Выводы. Из изложенного следует, что метод частотного алгебраического декодирования сверточных кодов на основе БПФ Винограда целесообразно использовать для сверточных кодов с длиной входного кодового ограничения $r \ge 6$, однако существенное уменьшение вычислительной сложности происходит при $r \ge 11$.

Список литературы: 1. *Блейхут P*. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов / *P. Блейхут*; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 448 с. 2. *Приходько С.И.* Алгебраическое декодирование сверточных кодов / *С.И. Приходько, С.А. Гусев, А.С. Постольный, А.С. Жученко* // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Х.: УкрДАЗТ, 2005. – № 6. – С. 29-37. **3.** Штомпель М.А. Метод алгебраїчного декодування згорткових кодів у частотній області / М.А. Штомпель // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 98. – С. 104-111. **4.** Приходько С.И. Метод блокового частотного декодирования сверточных кодов / С.И. Приходько, Н.А. Штомпель, А.В. Бушримас // Системи обробки інформації. – 2008. – Вип. 7 (74). – С. 109-111. **5.** Штомпель М.А. Обчислювальна складність методу частотного декодування згорткових кодів / М.А. Штомпель // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 116. – С. 106-110.

Поступила в редколлегию 17.10.2011

УДК 681.324

П.Е.ПУСТОВОЙТОВ, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ДАННЫХ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ

Було досліджено загальні принципи функціонування вузла комп'ютерної мережі та побудовано модель із використанням апарату систем масового обслуговування. Було отримано формули розрахунку ймовірностей станів системи.

It was researched the functioning of network hub and the model was created, which uses the queuing system. It was got equations for system states probabilities.

Были исследованы общие принципы функционирования узла компьютерной сети и построена модель с использованием аппарата систем массового обслуживания. Были получены формулы расчета вероятностей состояний системы.

Вступление, постановка задачи. Компьютерные сети (КС) созданы для решения совокупности задач обработки потоков заявок на обслуживание. Программы П₁, ..., П_p решения задач обслуживания хранятся в постоянной или оперативной памяти интеллектуального узла. Объем, структура и содержание задач из разных потоков – различны. Поэтому различны и программы, их обрабатывающие. Заявки, поступающие на вход сети, инициируются в порядке, определяемом процессами, происходящими в среде передачи компьютерной сети и в самом узле. Они генерируются в объектах источниках сети и поступают в узел-приемник периодически или в произвольные, случайные моменты времени. При этом за короткий отрезок времени может поступить несколько заявок z_a, ..., z_w, для обслуживания которых должны быть выполнены соответствующие программы узла обслуживания П_а, ..., П_w. При наличии одного процессора в узле обслуживания эти программы могут быть выполнены только последовательно, в связи с чем возникают очереди заявок на обслуживание. При наличии нескольких процессоров (например, в коммутаторах) очереди на обслуживание (заявка на передачу пакета в порт назначения может быть поставлена в очередь) формируются в связи с занятостью порта назначения [1].

Обработка заявок в КС организуется по схеме, показанной на рисунке. Заявки $z_1, ..., z_m$ поступают в устройство «Слушатель входящего канала» узла сети. При появлении заявки z_i узел переключается на выполнение программы приема и постановки заявок в очередь (модуль «Диспетчер входящих пакетов»).



«Диспетчер входящих пакетов» определяет тип поступившей заявки и ставит заявку в соответствующую очередь O_j на обслуживание. Очередь в физическом отношении состоит из совокупности ячеек оперативной памяти, в которых размещаются коды поступивших заявок. В общем случае каждая из очередей содержит заявки, ожидающие обслуживания. Пусть в каждый момент времени узел может выполнять только одну программу обслуживания Π_k . Процесс выбора заявки из множества заявок, ожидающих обслуживания, называется диспетчированием.

Процедура диспетчирования реализуется программой, называемой «Диспетчер очередей», которая анализирует состояние очередей O_1, \ldots, O_S , выбирает заявку z_k , имеющую преимущественное право на обслуживание, и инициирует соответствующую прикладную программу Π_k . Считается, что в момент окончания работы программы обслуженная заявка покидает систему. По окончании программы Π_k управление вновь передается «Диспетчеру очередей», который выбирает очередную заявку и инициирует соответствующую прикладную программу. Если очереди отсутствуют, «Диспетчер очередей» находится состоянии ожидания.

Отметим важные особенности процесса функционирования компьютерной сети. Потоки заявок, поступающих в систему, являются случайными. Точно так же случайными для каждой заявки являются продолжительность ожидания начала обслуживания и длительность собственно обслуживания. Таким образом, весь процесс функционирования КС носит стохастический характер, что позволяет рассматривать такие системы как системы массового обслуживания (СМО) [2].

Анализ СМО может быть выполнен аналитически лишь при некоторых достаточно жестких предположениях относительно характера входящего потока и законов распределения продолжительности обслуживания.

Если входящий поток простейший, продолжительность обслуживания экспоненциальна, анализ может быть проведен с использованием теории марковских процессов [2]. При этом технология анализа в особенности проста, если потоки заявок однородны и, поэтому, их суперпозицию можно рассматривать как единый однородный входящий поток [2].

Основные результаты. Пусть на вход n-канальной системы с отказами поступает простейший входной поток с интенсивностью λ , а закон распределения продолжительности обслуживания имеет вид

$$G(t) = 1 - e^{-\mu t},$$

где µ – интенсивность обслуживания, равная количественно среднему числу заявок, которое каждый канал системы в состоянии обслужить. В силу экспоненциальности случайной продолжительности обслуживания поток обслуженных заявок является стационарным и ординарным [3]. Поэтому

$$\mu = 1/T_o$$

где T_o – среднее время обслуживания.

Для достаточно малого τ в силу ординарности потоков заявок и обслуживаний имеем

$$p_o(\tau) = e^{-\lambda \tau} \approx 1 - \lambda \tau; \quad p_1(\tau) = \lambda \tau e^{-\lambda \tau} \approx \lambda \tau; \quad p_k(\tau) = 0(\tau); \quad k \ge 2.$$
(1)

$$p'_{0}(\tau) = e^{-\mu\tau} \approx 1 - \mu\tau; \quad p'_{1}(\tau) = \mu\tau e^{-\mu\tau} \approx \mu\tau; \quad p'_{k}(\tau) = 0(\tau); \quad k \ge 2.$$
(2)

Здесь

 $p_k(\tau)$ – вероятность поступления ровно k заявок в течение интервала времени продолжительности τ ,

 $p'_{k}(\tau)$ – вероятность, обслуживания ровно *k* заявок в течении интервала времени продолжительности τ .

С учетом этих соотношений рассчитаем вероятности переходов системы $w_{ij}(\tau)$:

$$w_{ij} = \lim_{\tau \to 0} \frac{w_{ij}(\tau)}{\tau} \,. \tag{4}$$

Тогда

$$w_{01} = \lambda \; ; \; w_{10} = \mu \; ; \; w_{k-1,k} = \lambda \; ; \; w_{k,k-1} = k\mu \; ; \; w_{n-1} = \lambda \; ; \; w_{n,n-1} = n\mu \; . \tag{5}$$

Система дифференциальных уравнений Колмогорова А.Н. для вероятностей состояний имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{p}_{0}(t) = \mu p_{1}(t) - \lambda p_{0}(t), \\ \vdots \\ \dot{p}_{k}(t) = \lambda p_{k-1}(t) + \mu p_{k+1}(t) - p_{k}(t)(\lambda + k\mu). \end{cases}$$
(6)

Систему уравнений (6) необходимо дополнить условием нормировки $\sum_{k=0}^{n} p_k(t) = 1$. Для решения системы (6) можно использовать преобразование Лапласа [4].

При этом получим следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} s\pi_0(s) - p_0(0) = \mu\pi_1(s) - \lambda\pi_0(s), \\ \dots \\ s\pi_k(s) - p_k(0) = \lambda\pi_{k-1}(s) + \mu\pi_{k+1}(s) - \pi_k(s)(\lambda + k\mu), \\ s\sum_{k=0}^n \pi_k(s) = 1. \end{cases}$$
(7)

Решив систему уравнений (7) обычным образом и выполнив обратное преобразование Лапласа, получим соотношения для $p_k(t)$, k = 0, 1, 2, ..., n.

Для оценки эффективности СМО интерес представляет асимптотическое поведение системы при $t \to \infty$. В этом случае, как можно показать [5], процесс в системе приобретает установившийся характер и поэтому $\lim_{t\to\infty} \dot{p}_k(t) = 0$. То-

гда дифференциальные уравнения для вероятностей состояний системы упрощаются к виду:

$$\begin{cases} \lambda p_0 - \mu p_1 = 0, \\ \dots \\ \lambda p_{k-1} - (\lambda + k\mu) p_k + (k+1)\mu p_{k+1} = 0, \ k = 1, 2, \dots, n-1. \end{cases}$$
(8)

Введем новую переменную $z_k = \lambda p_{k-1} - k\mu p_k$. Тогда полученная система уравнений (8) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} z_1 = 0, \\ \\ z_k - z_{k+1} = 0, \ k = 1, 2, ..., n, \end{cases}$$
(9)

откуда, как легко видеть,

$$z_1 = z_2 = \dots = z_n = 0$$
.

Тогда

$$z_k = \lambda p_{k-1} - k\mu p_k = 0, \qquad k = 1, 2, \dots, n .$$
 (10)

Из уравнения (10) следует рекуррентное соотношение $p_k = \frac{\lambda}{k\mu} p_{k-1}$, ис-

пользуя которое, получим,

$$p_1 = \frac{\lambda}{\mu} p_0; \quad p_2 = \frac{\lambda}{2\mu} p_1 = \frac{\lambda^2}{2!\mu^2} p_0, \dots, p_k = \frac{\lambda^k}{k!\mu^k} p_0.$$
(11)

Таким образом, вероятности всех состояний выражены через p_0 . Для расчета p_0 используем условие нормировки. При этом

1.

$$\sum_{k=0}^{n} p_{k} = \sum_{k=0}^{n} \frac{\lambda^{k}}{k! \mu^{k}} p_{0} = p_{0} \sum_{k=0}^{n} \frac{\lambda^{k}}{k! \mu^{k}} = 1, \qquad (12)$$

откуда

$$p_{0} = \frac{1}{\sum_{k=0}^{n} \frac{\lambda^{k}}{k! \mu^{k}}}, \quad p_{k} = \frac{\frac{\alpha^{n}}{k!}}{\sum_{l=0}^{n} \frac{\alpha^{l}}{l!}}, \quad k = 0, 1, 2, ..., n, \quad \alpha = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda T_{o}.$$
(13)

Эти соотношения называют формулами Эрланга. Заметим, что они верны для систем с отказами в случае произвольного закона распределения времени обслуживания.

Выводы. Таким образом, функционирование узла компьютерной сети было представлено как многоканальную систему массового обслуживания с ограниченной очередью. Были получены соотношения для вероятностей всех возможных состояний системы, что позволяет без труда определить основные характеристики системы массового обслуживания как средняя длина очереди, средняя продолжительность пребывания заявки в системе, вероятность отказа и т.п. Приведенная выше известная методика анализа системы обслуживания с отказами может быть применена для описания и оценки эффективности функционирования более сложных систем, являющихся моделями многовходовых компьютерных сетей.

Список литературы. 1. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 4-е изд. / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с. 2. Ивченко Г.И. Теория массового обслуживания / Г.И.Ивченко, В.А. Каштанов, И.Н. Коваленко. – М.: Высшая школа, 1982. – 412 с. 3. Хинчин А.Я. Работы по математической теории массового обслуживания / А.Я. Хинчин. – М.: Сов. Радио, 1963. – 284 с. 4. Диткин В.А. Интегральные преобразования и операционное исчисление / В.А. Диткин, А.П. Прудников. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 332 с. 5. Чжун Кай-Лай Однородные цепи Маркова: пер. с англ. / Кай-Лай Чжун. – М.: МИР, 1964. – 420 с.

Поступила в редколлегию 03.10.2011

С. С. РУДЕНКО, инженер, НТУ «ХПИ»; *А. А. ПЕТКОВ*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗИСТОРОВ ТВО-10 И ТВО-60

В роботі експериментально-розрахунковим шляхом отримані теплофізичні характеристики резисторів ТВО-10 та ТВО-60. Досліджено залежність теплового режиму роботи від величини їх опору та орієнтації у просторі. Отримано співвідношення для розрахунку теплоємності резистора із даних режиму охолодження при степеневій залежності коефіцієнту тепловіддачі від температури.

In the work the thermal characteristics of the TVO-10 and TVO-60 resistors were determined by experimental-calculation method. The thermal conditions dependence on its resistance magnitude and orientation in space was investigated. The relation for the calculation of the resistor thermal capacity from cooling mode data at the power dependence of the heat-transfer coefficient on the temperature was obtained.

В работе экспериментально-расчетным путем получены теплофизические характеристики резисторов ТВО-10 и ТВО-60. Исследована зависимость теплового режима работы от величины их сопротивления и ориентации в пространстве. Получено соотношение для расчета теплоемкости резистора по данным о режиме охлаждения при зависимости степени коэффициента теплоотдачи от температуры.

Постановка проблемы. Резисторы типа ТВО нашли широкое применение в высоковольтных импульсных испытательных устройствах (ВИИУ) в качестве зарядных, защитных и формирующих элементов. Такая распространенность резисторов обусловливает интерес к их тепловому режиму работы, который, кроме амплитудно-временных параметров протекающего электрического тока, зависит также от теплофизических характеристик (ТФХ) резистора: коэффициента теплоотдачи и теплоемкости. Эти характеристики устанавливают связь между рассеиваемой электрической энергией и температурой.

ТФХ определяются конструкцией резистора и характеристиками материалов, из которых он изготовлен. Также, может иметь место, и косвенная зависимость ТФХ от номинального сопротивления.

Учитывая, что с целью оптимизации ВИИУ резисторы ТВО часто используются в режимах более жестких, чем задано в технической документации, определение ТФХ, обеспечивающих их тепловые расчеты является актуальной задачей.

Анализ публикаций. Общие положения метода определения ТФХ резистора отображены в [1]. При этом показано, что его коэффициент теплоотдачи является сложной функцией многих факторов, в большой степени зависящей от температуры перегрева, а также от шероховатости поверхности, коэффициента ее черноты, температуры окружающей среды. Однако в самом методе такая зависимость не учитывается.

В [2] показана практическая реализация метода определения ТФХ в применении к мощным резисторам, нашедшим широкое распространение в электротехнике. В частности, приведены ТФХ высоковольтных объемных резисторов типа ТВО, за исключением ТВО-10 и ТВО-60.

В [3] получена экспериментальная зависимость коэффициента теплоотдачи от перегрева и определена теплоемкость резистора ТВО-60-51 Ом. Однако, в работе не учтена зависимость ТФХ от величины сопротивления резистора и способа расположения (вертикально или горизонтально), а полученные ТФХ не подтверждены статистикой.

Целью данной работы является определение теплоемкости резисторов ТВО-10 и ТВО-60, с учетом зависимости коэффициента теплоотдачи от перегрева резистора, а также рассмотрение влияния сопротивления резисторов и способа их расположения на ТФХ.

Результаты исследований. Определение коэффициента теплоотдачи проводилось по известной методике [2] с использованием кривых нагрева. Общий вид и электрическая схема установки для их получения показаны на рис. 1. При проведении экспериментов использовались термоэлектрические преобразователи (ТЭП) типа алюмель-хромель l (см. рис. 1, a), конструктивно собранные в блок термоэлектрических преобразователей (БТЭП) 2. ТЭП размещались в центрах поверхностей резистора 3, подключенного к источнику переменного напряжения. Для контроля величины термоэдс на каждом ТЭП использовался вольтметр 4. Нагрев резисторов ТВО-60 производился при подведенных мощностях 10,4; 20; 30; 40 и 55 Вт, а ТВО-10 – 2; 5; 5,4; 6,4; 7 и 10 Вт, при естественной теплоотдаче без обдува. В течении экспериментов отклонение от приведенных значений мощности не превышало 3%.

В работе исследованы кривые нагрева четырех резисторов TBO-10 с номинальными сопротивлениями 27 и 82 Ом, а также четырех TBO-60 с номинальными сопротивлениями 24, 51 и 75 Ом.

Определение ТФХ резистора выполнялось на основании уравнения теплового баланса, который для условий исследования имеет вид [1]:

$$cmdT + \alpha STdt = I^2 Rdt , \qquad (1)$$

где I – действующее значение тока проходящего через резистор; R – сопротивление резистора; c – удельная теплоемкость резистора; α – коэффициент теплоотдачи; S – площадь поверхности резистора; m – масса резистора.

Решение уравнения (1) при условии, что через резистор протекает ток, изменяющийся в начальный момент времени скачком от 0 до *I*, позволяет рассчитать нагрев поверхности резистора [1]:

$$T = T_0 + \frac{I^2 R}{\alpha S} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \tag{2}$$

где T_0 – начальное значение температуры поверхности резистора; t – время протекания тока; τ – постоянная времени нагрева $\tau = cm/\alpha S$.





Рисунок 1 – Исследовательская установка: *а* – общий вид основных элементов; *б* – электрическая схема

Как известно [1], коэффициент теплоотдачи α определяется по кривым нагрева при условии $t \to \infty$, как:

$$\alpha = \frac{I^2 R}{S(T_y - T_0)},\tag{3}$$

где T_y – установившаяся температура, T_0 – температура окружающей среды.

При исследовании влияния расположения резистора и величины его сопротивления на коэффициент теплоотдачи α были получены линейные коэффициенты вариации, при изменении расположения (вертикально или горизонтально) – K_1 и величины сопротивления – K_2 (изменение сопротивления от 24 Ом до 75 Ом и от 27 Ом до 82 Ом для ТВО-60 и ТВО-10 соответственно). При этом коэффициент вариации K_i , %, определялся по соотношению:

$$K_i = \frac{\left|\alpha_{\max} - \alpha_{\min}\right|_i}{\overline{\alpha}} \cdot 100, \qquad (4)$$

где α_{\max} , α_{\min} и $\overline{\alpha}$ – максимальное, минимальное и среднее значения коэффициента теплоотдачи соответственно.

Полученные значения коэффициента вариации приведены для указанных интервалов изменения перегрева поверхности резистора в табл. 1.

Интервал	TBC)-60	TBO-10		
перегрева	V 0/	V = 0/	V = 0/	V = 0/	
ΔT , C °	$\Lambda_1, 70$	$\Lambda_2, 70$	$\Lambda_1, 70$	$\Lambda_2, 70$	
130-110	8,9	10,4	-		
110-100	-	-	5,6	4,4	
90-80	10,9	7,1	_		
75-65	-	_	5,1	4,5	
35-25	9,2	4,0	6,8 6,9		

Таблица 1 – Коэффициенты вариации температуры для ТВО-10 и ТВО-60

Как видно из табл. 1, у резисторов ТВО-60 и ТВО-10 наблюдается зависимость коэффициента теплоотдачи от способа расположения и сопротивления резистора, однако, коэффициент вариации для всех случаев не превышает 11% и 7,1% соответственно. Указанные обстоятельства позволяют, с целью дальнейшего анализа, объединить экспериментальные данные в единые совокупности по каждому типу резистора (см. рис. 2).



Расчеты показывают, что экспериментальная зависимость коэффициента теплоотдачи α от перегрева ΔT (см. рис. 2), наиболее точно аппроксимируется степенной функцией (максимальная погрешность не превышает 10 %):

$$\alpha = A \cdot \Delta T^B, \tag{5}$$

где *А* и *В* – постоянные коэффициенты.

Процедура получения коэффициентов зависимости (5) из экспериментальных данных реализована в среде электронных таблиц Microsoft Excel.

Для нахождения величины теплоемкости, в отличие от [2], использовались данные не по режиму нагрева, а по режиму охлаждения резисторов. Это обусловлено тем, что резисторы типа ТВО имеют многослойную структуру (см. рис. 3) и их нагрев происходит постепенно: в начале нагревается резистивный элемент 1, далее прогревается керамический слой 2 и в конце лакокрасочное защитное покрытие 3. Таким образом, до достижения установившейся температуры в режиме нагрева, имеет место резко неоднородное распределение температуры в теле резистора и масса вещества, которая поглотила основную величину выделившейся энергии, не равна массе резистора.



Рисунок 3 - Поперечное сечение резистора ТВО-10

При рассмотрении режима охлаждения (после достижения установившейся температуры при нагреве) вся масса резистора восприняла выделившуюся энергию, распределение температуры более равномерно и полученные ТФХ характеризуют весь объем резистора. В режиме охлаждения правая часть уравнения (1) будет равна нулю. Тогда с учетом зависимости (5), решение уравнения (1), при начальных условиях t = 0; $T(0) = T_0 + \Delta T_n$, где ΔT_n – начальный перегрев, будет иметь вид:

$$T = \frac{1}{\sqrt[B]{\frac{ABSt}{cm} + \Delta T_{n}^{-B}}} + T_{0}, \qquad (6)$$

откуда теплоемкость:

$$cm = \frac{ABSt}{\Delta T^{-B} - \Delta T_{\rm u}^{-B}} \,. \tag{7}$$

В соответствии с полученными экспериментальным путем кривыми охлаждения, из выражения (7) рассчитаны значения теплоемкостей резисторов. При этом, для каждого из ТЭП поставлены в соответствие наборы расчетных значений теплоемкости, для которых были определены среднее значение теплоемкости, среднеквадратическое отклонение σ и сделана оценка грубых ошибок эксперимента в соответствии с методом Грэббса [4]. При проведении расчетов процент риска принимался равным 5 %.

В табл. 2 приведены результаты статистического анализа по определению средней теплоемкости $(cm)_{cp}$, а также эмпирические выражения для расчета коэффициента теплоотдачи в зависимости от перегрева резисторов типа ТВО-10 и ТВО-60, при изменении номинального сопротивления от 24 до 82 Ом и от 27 до 75 Ом соответственно.

	рра Коэффициент теплоотдачи α, Βτ/(°C·м ²)	Теплоемкость:			
Тип резистора		среднее значе- ние (<i>cm</i>) _{ср} , Дж /⁰С	<i>σ</i> , Дж∕°С	количество данных в выборке, <i>п</i>	
TBO-10	$\alpha = 10,25 \cdot \Delta T^{0,187}$	36,3	3,8	177	
TBO-60	$\alpha = 3,75 \cdot \Delta T^{0,270}$	513	41	95	

Таблица 2 – Теплофизические характеристики резисторов ТВО-10 и ТВО-60

Выводы:

1. В результате проведения экспериментальных и теоретических исследований стационарных режимов работы резисторов ТВО-10 и ТВО-60, были определенны их теплофизические характеристики: зависимость величины коэффициента теплоотдачи от температуры, и средняя теплоемкость.

2. Экспериментальным путем показано, что влияние на температуру поверхности резистора его сопротивления (в указанных в работе пределах) и расположения относительно горизонта не превышают 7,1 и 11% соответственно.

Материалы работы могут быть использованы для дальнейших исследований и тепловых расчетов резисторов, при их эксплуатации в режимах характерных ВИИУ, а также для определения ТФХ других типов резисторов.

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. Зинкевич Н.М. Перегрузочная способность резисторов / Н.М. Зинкевич // Электронная техника. – 1970. – № 1. – С. 73-83. 3. Руденко С.С. Экспериментальные исследования теплофизических характеристик высоковольтных резисторов ТВО-60 / С.С. Руденко, А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків : НТУ «ХПІ», 2009. – № 39. – С. 162-168. 4. Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки / Я.Д. Колкер. – К : Техника, 1976. – 200 с.

Поступила в редколлегию 25.08.2011.

О.А.СЕРКОВ, д-р техн. наук, зав. кафедрою, НТУ «ХПІ»; *С.О.НІКІТІН*, аспірант, НТУ «ХПІ»; *Л.О.НІКІТІНА*, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПІ»

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РАДІОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ МЕРЕЖ ІЕЕЕ 802.22 WRAN

Запропоновано метод підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу за рахунок прискорення процедури аналізу діапазону радіочастот та скорочення кількості стрибків за частотою.

This paper discusses questions related to development of the method for increasing the efficiency of radio spectrum using by decreasing the time for the radio spectrum sensing and the number of frequency hops.

Предложен метод повышения эффективности использования радиочастотного ресурса за счет ускорения процедуры анализа диапазона радиочастот и сокращения количества прыжков за частотой.

Сучасний попит на послуги бездротових телекомунікаційних систем широкосмугового доступу не забезпечується повною мірою. Особливо це стосується приміської зони та сільської місцевості, адже постачальники таких послуг найчастіше орієнтовані на обслуговування густонаселених районів великих міст. Таким чином реалізація бездротових мережевих рішень регіонального масштабу є актуальною та перспективною. Поява та бурхливий розвиток бездротових систем, таких як системи стільникового та супутникового зв'язку, EV-DO та LTE, систем на грунті бездротових мережевих технологій Wi-Fi та Wi-MAX спричинили серйозну проблему, пов'язану з використанням радіочастотного діапазону. Практично весь радіочастотний діапазон до теперішнього часу розподілено та ліцензовано, але його використання не є достатньо ефективним. Впровадження та використання нових сервісів, для роботи яких необхідна наявність вільних частотних діапазонів, стає важким, а іноді й неможливим.

Перспективним підходом для забезпечення більш ефективного використання радіочастотного спектру є впровадження механізмів інтелектуального управління (когнітивне радіо), тобто адаптивних механізмів формування параметрів радіоінтерфейсу.

Принципи когнітивного радіо доцільно використовувати для побудови бездротових регіональних мереж. Першим стандартом, в основу якого закладені ці принципи, є стандарт IEEE 802.22 WRAN, який на даний момент знаходиться в розробці. Він передбачає роботу в телевізійному частотному діапазоні, що дозволяє досягати радіуса дії до 100км без обмеження потужності. Таким чином його доцільно використовувати для реалізації регіональних бездротових мереж. Передача даних здійснюється на каналах, не зайнятих первинними системами (телемовленням і бездротовими мікрофонами). У зв'язку з цим головним завданням розробників є захист цих систем від можливих завад, що вносяться роботою систем стандарту IEEE 802.22.

Специфікація IEEE 802.22 являє собою проект бездротових регіональних мереж, що описує дворівневу архітектуру (рівень PHY і рівень MAC) з багатоточковим (point-to-multipoint) з'єднанням. Мережа призначена як для роботи з професійними фіксованими базовими станціями, так і з портативними (або фіксованими) терміналами (модеми) користувачів. Обмін даними за стандартом проводиться на «вільних» частотах VHF/UHF телевізійного мовлення, що складає смугу від 54 до 862МГц. За твердженням розробників, мережа в основному призначена для використання в малонаселених пунктах, а також сільській місцевості, де найімовірніше буде достатня кількість вільних каналів в робочій смузі частот стандарту.

Рівень МАС базується на застосуванні технології когнітивного радіо. Він повинен мати можливість автоматичної адаптації до змін у радіочастотному середовищі шляхом аналізу спектру частот. Рівень складається з двох структур: фрейм та суперфрейм. Суперфрейм складається з контрольного заголовку SCH, преамбули та послідовності фреймів. SCH та преамбула відправляються базовою станцією (БС) за усіма вільними для передавання каналами. Коли термінал користувача (СРЕ) починає роботу у мережі, він аналізує спектр, виявляє доступні вільні канали та отримує усю необхідну інформацію для підключення до БС.

СРЕ виконує два типи аналізу спектру: внутрішньосмуговий та позасмуговий. Внутрішньосмугове вимірювання полягає у аналізі поточного каналу, що використовується для зв'язку з БС. Позасмугове вимірювання полягає у аналізі усіх інших каналів. Рівень МАС виконує два типи аналізу для внутрішньосмугових та позасмугових вимірювань: швидкий та точний. Швидкий аналіз має швидкість зондування 1мс на канал. Цей тип аналізу здійснюється і СРЕ, і БС. БС збирає інформацію від усіх СРЕ та приймає рішення щодо необхідності подальшого зондування. Точний аналіз вимагає значно більшого часу (25 мс та більше на кожний канал) та використовується на основі інформації, отриманої при швидкому зондуванні.

Ці механізми використовуються для визначення того, чи є у наявності сторонні передачі, втручання до яких необхідно уникнути.

Ширина одного каналу мережі IEEE 802.22 WRAN складає 6 МГц. За умови використання діапазону 54-862 МГц кількість можливих каналів становить 134. При використанні наведеного механізму, кожне швидке вимірювання триває до 134 мс та вимагає радіомовчання від усіх передавачів чарунки, що при періоді вимірювань у 1 с знижує пропускну здатність мережі до 13,5 %.

Окрім аналізу спектру, важливим завданням є розподіл вільних каналів між користувачами. Оскільки канал використовується лише за умови відсут-

ності сторонніх передач та повинен бути звільненим при їх появі, переходи між каналами займають досить багато часу та можуть вплинути на якість обслуговування користувачів. За стандартом IEEE 802.22 при виникненні колізії перехід здійснюється до першого вільного каналу без урахування ймовірності виникнення нової колізії.

З огляду на це, доцільною буде розробка методів, які повинні забезпечити більшу пропускну здатність системи - методу аналізу діапазону, який матиме меншу порівняно з існуючим тривалість, та методу планування розподілу каналів між користувачами з урахуванням ймовірності колізій.

Оскільки технологія IEEE 802.22 знаходиться на стадії стандартизації і не є достатньо випробуваною на практиці, проводити оцінку продуктивності мережі при тому чи іншому методі аналізу та розподілення діапазону здійснити досить складно. Для цього на даному етапі доцільно застосовувати імітаційне моделювання, розробивши модель користувача для даної мережі з усіма необхідними вхідними початковими параметрами.

Для оцінки підвищення ефективності використання радіочастотного спектру слід зробити оцінку ефективності використання радіоспектру в конкретному регіоні при реалізації мережі стандарту IEEE 802.22 з урахуванням існуючих систем телебачення, радіомовлення та інших користувачів діапазону.

Мета роботи є розробка методу аналізу радіочастотного спектру та розподілення каналів для мережі IEEE 802.22 WRAN, які здатні підвищити продуктивність мереж, із подальшою оцінкою ефективності використання спектрального діапазону даною мережею.

Для досягнення поставленої мети слід обгрунтувати застосування принципів когнітивного радіо для побудови безпровідних регіональних мереж, здійснити аналіз підходів до зондування радіочастотного діапазону та розподілення каналів та розробити метод зондування радіочастотного діапазону та розподілення каналів.

Стандартом IEEE 802.22 передбачено включення інтервалу радіомовчання до кожного суперфрейму для внутрішньоканального аналізу. Тривалість такого інтервалу складає 1мс на кожні 160мс. У разі виявлення колізії БС виконує точний аналіз тривалістю від 25мс для каналу. За результатом точного аналізу БС приймає рішення щодо зміни каналу зв'язку з СРЕ. Крім цього БС та СРЕ періодично сканують весь діапазон методом швидкого аналізу для виявлення резервних каналів. У разі виникнення колізії та підтвердження сторонньої передачі, БС переводить СРЕ на перший вільний резервний канал. Наведена схема є ефективною за умови інформованості системи щодо постійно діючих сторонніх користувачів радіочастотного ресурсу та невеликої кількості сторонніх користувачів даріочастотного ресурсу та невеликої кількості появи колізій у каналах, на які переводяться СРЕ. Крім цього, схема не враховує співіснування з сусідніми чарунками WRAN на період швидкого сканування діапазону.

На основі проведених досліджень було запропоновано нову схему зваженого аналізу діапазону та планування розподілу каналів. Ця схема спрямована на подолання недоліків стандартних схем аналізу та розподілення діапазону шляхом розрахунку ймовірностей виникнення колізій на каналах з урахуванням часового параметру та координації дій сусідніх БС.

Головна ідея запропонованого методу полягає в побудові карти ймовірностей виникнення колізій на каналах, побудові оцінних функцій та сортуванні переліку доступних вільних каналів у порядку збільшення значення функції. Приклад діаграми використання каналів наведено на рис. 1.



Інформація щодо виникнення колізій накопичується у базі даних на БС. Накопичені дані оброблюються з метою виявлення залежності використання каналу ліцензованими користувачами від часового параметру. Обробка статистичних даних виконується з урахуванням пошуку періодичності використання каналу. Результатом такої обробки є функції вигляду (1)

$$\eta_n = F(t,n);$$

$$t_m = F_m(t,n),$$
(1)

де η_n – імовірність зайнятості каналу, t_{3n} – час, протягом якого канал імовірно залишиться вільним, t – час проведення розрахунку, а n – номер каналу. Вигляд функцій змінюється для каналу n кожен раз, коли у ньому виникає колізія, адже змінюється масив накопичених даних.

У разі виникнення колізії програмне забезпечення БС розраховує t_{эп} для

кожного з вільних каналів, після чого для кожного каналу розраховується оцінна функція:

$$\xi_n = \frac{N}{\sum_k t_{sk}} \,, \tag{2}$$

де ξ_n – оцінна функція для каналу n, N – кількість сусідніх каналів, що потрібно використати, k – номер каналу, який відповідає наступній умові:

$$n - \frac{N}{2} \le k \le n + \frac{N}{2},\tag{3}$$

Наступним кроком є вибір каналу з найменшим значенням ξ_n для продовження роботи з СРЕ.

Запропонована оцінна функція дозволяє зменшити імовірність повторної колізії для СРЕ, а як наслідок – зменшити кількість перестроювань частоти та збільшити за рахунок цього ефективність використання діапазону.

Пришвидшити процес аналізу усього діапазону можна за рахунок попереднього розрахунку значень η_n для усіх каналів, сортування переліку каналів за значенням η_n та послідовного аналізу каналів за створеним переліком. Однак слід аналізувати не всі канали, а лише їх необхідну кількість. Наприклад, якщо у поточний момент з БС працює М станцій СРЕ, то достатньо мати М резервних каналів.

Використання прогностичної імовірнісної моделі дозволить зменшити вплив системи на ліцензованих користувачів діапазону. Цього можна досягти, якщо виділяти канал для СРЕ не безстроково, а лише на період t_{3n} з моменту виділення, після чого примусово переводити СРЕ на інший вільний канал, навіть якщо у каналі не виникло колізії.

Розглянемо випадок з двома БС (рис. 2).



Рисунок 2 – Імовірність зайнятості каналів для сусідніх БС
Кожна БС має свій перелік ймовірностей зайнятості каналів. Рекомендована процедура сканування така. Перед скануванням БС обмінюються таблицями ймовірностей. Процес сканування починається одночасно. Якщо діапазони каналів кожної з БС з найнижчою імовірністю зайнятості не перетинаються, кожна з БС сканує свій. Якщо ж канал є спірним, він віддається тій БС, для зони покриття якої імовірність його зайнятості ліцензованими користувачами менша.

В подальшому доцільно розробити метод побудови оцінних функцій, імітаційну модель для оцінки пропускної здатності мережі стандарту IEEE 802.22 із використанням розробленого методу та запропонувати методику оцінки ефективності використання спектру мережами стандарту IEEE 802.22 на заданій місцевості.

Висновки. Таким чином обгрунтовано доцільність побудови бездротових регіональних мереж на принципах когнітивного радіо відповідно до стандарту IEEE 802.22, запропоновано метод зваженого аналізу діапазону та планування розподілу каналів для підвищення ефективності використання радіочастотного діапазону.

Список літератури: 1. Carlos Cordeiro, Kiran Challapali, Monisha Ghosh Cognitive PHY and MAC Layers for Dynamic Spectrum Access and Sharing of TV Bands. – Philips Research North America. 2. Cordeiro C. et al., «A PHY/MAC Proposal for IEEE 802.22 WRAN Systems,» IEEE 802.22 doc. no. 22-06-0005-05-0000, March 2006. 3. Wendong Hu, Daniel Willkomm Dynamic Frequency Hopping Communities for Efficient IEEE 802.22 Operation. – STMicroelectronics Inc., Technical University Berlin, University of California, Los Angeles. 4. 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.

Надійшла до редколегії 27.10.2011.

УДК 537.528:621.762.3

О.Н.СИЗОНЕНКО, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

Г.П.БОГАТЫРЕВА, д-р техн. наук, зав. лаб., Институт сверхтвердых материалов им. Бакуля НАН Украины, Киев;

Н.А.ОЛЕЙНИК, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт сверхтвердых материалов им. Бакуля НАН Украины, Киев;

Г.Д.ИЛЬНИЦКАЯ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт сверхтвердых материалов им. Бакуля НАН Украины, Киев;

А.Д.ЗАЙЧЕНКО, млад. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

Е.В.ЛИПЯН, млад. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

А.С.ТОРПАКОВ, млад. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ НА ИЗМЕНЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА АЛМАЗНЫХ ПОРОШКОВ

Наведено результати експериментальних досліджень впливу високовольтних електричних розрядів на гранулометричний склад синтетичного мікропорошку алмазу ACM20/14 та алмазного шліфпорошку AC20 зернистістю 100/80.

The results of experimental research of the high voltage electric discharge impact onto the granulometric composition of the synthetic diamond micropowder ACM20/14 and polishing diamond powder AC20 with the grain size 100/80 are represented.

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния высоковольтных электрических разрядов на гранулометрический состав синтетического микропорошка алмаза Acm20/14 и алмазного шлифпорошка Ac20 зернистостью 100/80.

Введение. Порошки синтетического алмаза широко используют при изготовлении абразивного инструмента для механообработки труднообрабатываемых материалов.

Химические и механические способы воздействия, применяемые при изготовлении алмазных порошков, влияют на ситовые характеристики алмазного сырья. Эти способы чрезвычайно длительны.

Известно, что процессы разделения дисперсных систем, в том числе процессы сортировки кристаллов алмаза, которые применяют при изготовлении порошков, наиболее эффективны, если порошок однороден по крупности. Эксплуатационные характеристики инструмента также зависят от однородности и гранулометрического состава используемых порошков.

Экологически безопасным и эффективным способом воздействия на дисперсные системы является воздействие высоковольтного электрического разряда (ВЭР) в жидкости [1 - 4]. Высокая концентрация энергии в канале разряда приводит к возникновению волн давления, близких к ударным, которые трансформируются в акустические с широким спектром частот, мощных гидропотоков, кавитации, электромагнитных и термических полей. Эти явления позволяют влиять как на изменение геометрических размеров объекта, так и на структуру материалов с целью придания им определенных механических и физических свойств.

Целью данной работы является исследование влияния обработки ВЭР на гранулометрический состав алмазных порошков.

Объекты и методы исследования. Исследования проведены на продукте синтеза (ПС) алмаза, полученном в ростовой системе Ni–Mn–C. ПС подвергали ВЭР обработке, затем химически очищали. Из продуктов дробления изготавливали шлиф- и микропорошки различных зернистостей K_o – микропорошок ACM 20/14 и шлифпорошок AC20 зернистостью 100/80.

Исследования выполняли на экспериментальном стенде, конструкция которого детально описана в [4]. Обработке подвергалась суспензия порошков в дистиллированной воде.

Параметры разрядного контура были подобраны так, чтобы обеспечить давление в канале разряда до 800 МПа. Суммарная энергия обработки W_{Σ} составляла от 425 до 1600 кДж.

При исследовании использованы методы: химического, магнитного, гравиметрического, ситового анализа, методы оптической и растровоэлектронной микроскопии. Характеристики качества порошков определены по методикам ДСТУ 3292-95. Содержание внутрикристаллических включений металларастворителя определяли по величине удельной магнитной восприимчивости (χ).

Результаты и обсуждение. Применение различных видов обработки существенно изменяет распределение ПС по размеру после растворения металлической составляющей (рис. 1). Материал концентрируется в классе крупности от 100 до 630 мкм, т.е. происходит его усреднение. После химической дезинтеграции масса в этом классе составляет 41 %, после механической дезинтеграции – 90 %, после ВЭР обработки – 94 %.

Степень раскрытия материала (по коэффициенту Фоменко) составляет от 0,95 до 0,96 после химической и от 0,94 до 0,95 после механической дезинтеграции, после ВЭР обработки от 0,98 до 0,99. Это позволяет в процессе гравитационного разделения алмаза и графита, вывести до 35 % массы материала в виде графитового продукта. Выход высококачественных порошков с повышенной прочностью, изготовленных из алмазного сырья, извлеченного из ПС после ВЭР обработки, на 3–5 % выше, чем порошков, полученных по традиционной технологии (рис. 2).



Рисунок 1 – Суммарный выход дисперсного ПС после растворения металлической составляющей и последующих обработок: химической (1), механической дезинтеграции (2), ВЭР обработки (3)



Рисунок 2 – Прочность при статическом сжатии порошков: норма прочности порошков марки AC 50(1), AC 32 (2), порошков, полученных после химической (3), механической (4) дезинтеграции ПС, ВЭР обработки (5)

В результате ВЭР обработки при $W_{\Sigma} = 1560$ кДж (рис. 3) в класс крупности – 6 мкм переходит до 80 % частиц алмаза. После химической очистки этих порошков в них присутствует меньшее количество растворимых включений и нерастворимых примесей, абразивная способность порошка возрастает на 14,5 %, частицы характеризуются повышенной шероховатостью и развитой поверхностью (табл. 1).



Рисунок 3 – Распределение по крупности частиц алмаза исходного порошка марки ACM 20/14 (1) и после импульсной обработки ВЭР при 425 кДж (2) и 1560 кДж (3)

Таблица 1 – Удельная магнитная восприимчивость, несгораемый остаток и абразивная способность исходного микропорошка АМС 20/14 и порошка после ВЭР обработки

	X	апактепистики		
Образец	Удельная маг- нитная вос- приимчивость, $\chi \cdot 10^{-8}$, м ³ /кг	Несгораемый остаток, Н.О., %	Абразивная способ- ность, усл. ед.	
Исходный микропоро- шок ACM 20/14	9,3	0,57	4,84	
Порошок ACM 20/14 по- сле ВЭР обработки в во- де при $W_{\Sigma} = 1560$ кДж	5,7	0,40	5,54	

Из продуктов ВЭР обработки порошка алмаза AC 20 зернистостью 100/80 изготовили шлифпорошки марки AC 20 зернистостью 100/80, 80/63, 63/50 и микропорошки марки ACM зернистостью 60/40, 40/20, 28/14 (рис. 4).

Распределение по размерам исходного порошка AC 20 зернистостью 100/80 лежит в диапазоне от 40 до 140 мкм (рис. 5). ВЭР обработка оказывает интенсивное воздействие на обрабатываемый порошок, основной диапазон

распределения фракции неклассифицированного остатка по размеру составил от 1 до 2 мкм.

Установлено, что в результате обработки ВЭР получены более однородные по размеру порошки, у которых средний размер зерна меньше, форма зерен более округлая и изометричная. Полученные шлифпорошки содержат меньше примесей, что подтверждают несгораемый остаток и удельная магнитная восприимчивость, при этом их статическая прочность ниже, а абразивная способность выше (табл. 2).



Рисунок 4 – Выход шлиф- и микропорошков алмаза из продуктов ВЭР обработки шлифпорошка АС 20 зернистость 100/80



Рисунок 5 – Распределение частиц шлифпорошка AC20 зернистостью 100/80 по размерам до (1) и после ВЭР обработки (2 – остаток)

Таблица 2 – Характеристики шлифпорошка AC 20 дисперсностью 100/80 и изготовленных из него с применением обработки ВЭР порошков AC20 100/80 и ACM 28/14

Марка порошка	Несгораемый остаток, %	Удельная маг- нитная воспри- имчивость $\chi \cdot 10^8, {\rm M}^3/{\rm Kr}$	Абразивная способность	Статическая прочность, Н	Коэффициент формы К _ф			
		Исходный пороц	юк					
AC 20 100/80	0,98	0,63	4,6	17,9	1,18			
Порошки, изготовленные из АС 20 100/80, после обработки ВЭР								
AC 20 100/80	0,80	0,29	5,32	13,5	1,09			
ACM 28/14	1,55	39,3	4,16	Не определялись				

Выводы

1. Исследовано влияние ВЭР обработки алмазных порошков на их гранулометрический состав и установлено, что такая обработка перспективна для изготовления высококачественных порошков алмаза, так как обеспечивает их интенсивное дробление.

2. В процессе ВЭР обработки можно легко управлять процессом измельчения, получать порошки полидисперсного состава с повышенным (до 80%) содержанием фракции размером менее 6 мкм.

3. ВЭР обработка ПС является альтернативным методом химической и механической дезинтеграции. За счет усреднения материала по крупности и его раскрытия она позволяет снизить экологическую опасность процесса переработки ПС алмаза и обеспечивает на 3–5 % выше выход порошков с повышенной прочностью.

Список литературы: 1. Курец В.В., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. – 324 с. 2. Бакуль В.Н., Никитин Ю.И. Способ дробления сверхтвердых материалов // Электронная обработка материалов. – 1976. – Вып. 2. – С. 18-22. 3. Сизоненко О.Н., Малюшевский П.П., Горовенко Г.Г. Разрядноимпульсная технология дробления и измельчения абразивных материалов / Основные проблемы разрядноимпульсной технологии. – Киев: Наук. думка, 1980. – С. 12-20. 4. Сизоненко О.Н., Богатырева Г.П., Майстренко А.Л., Тафтай Э.И., Петасюк Г.А., Олейник Н.А., Торпаков А.С., Липян Е.В., Зайченко А.Д. Влияние высоковольтных импульсных разрядов на морфометрические характеристики алмазных микропорошков // Вісник українського матеріалознавчого товариства. – 2010. – № 1 (3). – С. 23-32.

Поступила в редколлегию 30.09.2011

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

Л.Л.ЧЕРНЕНСКИЙ, ст. преп., Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

А.В.ОРЛОВ, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Т.К.ГЕРАСТЕНОК, студент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

О.С.БЕЛОВА, студент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ОБЛАКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛНИЕЗАЩИТЫ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА МОДЕЛЯХ

Представлено результати експериментальних досліджень і фізичного моделювання процесів ураження блискавкою зосереджених об'єктів і дослідження ефективності їх блискавкозахисту з використанням штучних заряджених аерозольних хмар. Проаналізовано вплив характеристик моделей стрижневих блискавковідводів та об'єктів на процес їх ураження розрядом із хмари зарядженого водного аерозолю. Виконано порівняння експериментальних результатів з розрахунковими та експериментальними методиками визначення блискавкозахисту зосереджених об'єктів. Запропоновано рекомендації щодо вдосконалення блискавкозахисту енергетичних об'єктів.

Results of the experimental investigations and physical simulation of the processes of lightning affection of the compacted objects and the investigation of its lightning protection effectiveness using artificial charged aerosol clouds are presented. Influence of the characteristics of lightning rod and object models on the process of their affection by the discharge from cloud of charged water aerosol has been analyzed. Comparison of the experimental results with the calculated and experimental methods of determination of the compacted object lightning protection has been fulfilled. Recommendations on the improvement of power object lightning protection have been proposed.

Представлены результаты экспериментальных исследований и физического моделирования процессов поражения молнией сосредоточенных объектов и исследования эффективности их молниезащиты с использованием искусственных заряженных аэрозольных туч. Проанализировано влияние характеристик моделей стержневых молниеотводов и объектов на процесс их поражения разрядом из тучи заряженного водного аэрозоля. Выполнено сравнение экспериментальных результатов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащиты сосредоточенных объектов. Предложены рекомендации относительно совершенствования молниезащиты энергетических объектов.

Введение

Использование экспериментальных методов для исследования физики молнии и молниезащиты являлось и является актуальным [1, 2], так как без них невозможно детально проверить и проанализировать возможную эффективность действующих и перспективных средств защиты от прямых ударов молнии и ее вторичных воздействий. Современные расчетные методики определения молниезащищенности энергетических объектов, которые оценивают вероятность поражения их молнией и базируются на нахождении зон защиты молниеотводов, в качестве одного из главных факторов используют возможность возникновения встречных лидеров с объектов. Проверка этих методик многолетними наблюдениями за процессами поражения объектов разрядами молнии в естественных условиях мало эффективны из-за ограниченности и неоднозначности собранного материала, малой статистической выборки и дороговизны.

Базирующиеся на таком подходе существующие нормативные методики расчета и определения молниезащищенности различных объектов [3-6] часто расходятся в своих оценках на порядок величины и более. Это связано с тем, что до сих пор нет четкого и однозначного представления о процессе формирования молнии и поражению ею наземных объектов. Выявлению физической картины формирования восходящего лидерного разряда с наземного объекта и построению на ее основе физико-математической модели все последние десятилетия уделяется много внимания [1, 2, 7]. Однако целостной общепринятой модели этого процесса пока не создано.

Учет всех физических факторов, сопутствующих процессу поражения нисходящим отрицательным лидером молнии наземных объектов также не является решенной полностью проблемой, так как это требует построения сложной модели поражения наземных объектов молнией. В большинстве случаев просто упрощают задачу в стандартах и инженерных методиках (например, [8]), что ведет не только к существенным погрешностям при оценке, но и к физически мало обоснованным результатам. Определение условий и тенденций того, как и какие характеристики самого объекта влияют на вероятность поражения его разрядом молнии, в настоящее время является одним из основных направлений в области физики молнии и молниезащиты [8, 9]. В результате, проблема совершенствования действующих стандартов по молниезащите и методик расчета молниепоражаемости наземных объектов остается актуальной [10].

Поэтому не потеряли своей актуальности и развиваются методы физического моделирования разрядов молнии, особенно для решения проблем молниезащиты объектов [1, 2, 11].

Среди методов выделяется моделирование на макетах объектов с использованием длинной отрицательной искры в качестве аналога лидера молнии и имитация восходящих встречных разрядов с объектов [12]. Но в методах экспериментального моделирования поражения разрядом молнии моделей объектов с использованием генераторов импульсных напряжений условия эксперимента все-таки достаточно далеки от реальной грозовой обстановки, в которой всегда присутствует сильное электрическое поле самого грозового облака и своеобразно меняющееся поле отрицательного нисходящего ступенчатого лидера молнии. Кроме этого, многие нюансы процесса поражения молнией реальных объектов (например, конкурентное развитие восходящих лидерных разрядов, коронирование элементов конструкции объектов и взаимное влияние этого процесса на заряженное облако для высоких объектов и др.) в них практически не моделируются.

Одним из направлений при экспериментальном определении вероятности поражения объектов разрядом молнии может являться использование искусственных сильно заряженных аэрозольных водных облаков. Существующие методы создания искусственных заряженных аэрозольных облаков позволяют создавать облака объемом до десяти кубических метров и потенциалом в несколько мегавольт. Использование искусственных заряженных аэрозольных облаков открывает новые возможности при экспериментальном моделировании процесса поражения объекта молнией, существенно приближает физическое моделирование процесса поражения молнией наземных объектов к естественной грозовой обстановке без нанесения повреждений реальным объектам, дает возможность получить достаточный для анализа статистический материал.

Это открывает новые возможности при экспериментальном моделировании процесса поражения объекта молнией. Во-первых, это существенно приближает физическое моделирование процесса поражения молнией наземных объектов к естественной грозовой обстановке. Во-вторых, такой подход может значительной упростить экспериментальное моделирование процесса поражения молнией наземных объектов и даст возможность получать достаточный для анализа статистический материал, повысить надежность и безопасность эксплуатации существующих и проектируемых энергетических объектов путем выработки рекомендаций по дальнейшему совершенствованию их молниезащиты.

1 Экспериментально-измерительный комплекс для исследования процессов поражения молнией моделей объектов и эффективности их молниезащиты

Экспериментальный комплекс состоит из аэрозольной камеры размером объемом около 500 кубических метров, генератора заряженного аэрозоля (ГЗА), исследуемой электродной системы и измерительного комплекса. Ось струи заряженного аэрозоля находилась под углом α по отношению к горизонтальной поверхности нижнего заземленного электростатического экрана. Угол наклона оси заряженной аэрозольной струи по отношению к горизонтальной заземленной плоскости мог варьироваться в диапазоне от 0 градусов до 30 градусов. В ходе экспериментальных исследований использовался угол 12 градусов, для того чтобы нижняя кромка турбулентной струи была параллельна горизонтальной заземленной плоскости. В этом случае под облаком заряженного аэрозоля создается максимальная площадь области, где обеспечивается квазиоднородный характер распределения электрического поля. Ос-

новные параметры экспериментального комплекса представлены в [13, 14].

Создаваемое аэрозольное облако имеет объем несколько кубических метров. Ток выноса при экспериментах составлял 120 мкА. При этом, объемная плотность аэрозольного заряда на оси облака находится в диапазоне от $1,5\cdot10^{-4}$ до $1,0\cdot10^{-2}$ Кл/м³. Потенциал искусственного облака заряженного водного аэрозоля достигает 1,5 MB. В результате, между заряженным аэрозольным облаком и заземленной плоскостью создается сильное электрическое поле напряженностью до 12 кВ/см вблизи заземленной плоскости и до 22 кВ/см на границе облака заряженного аэрозоля (рис. 1).



Рисунок 1 – Распределение напряженности электрического поля в вертикальном сечении промежутка «облако заряженного аэрозоля – заземленная плоскость», проходящем через ось заряженной струи:

В области между нижней границей создаваемого заряженного аэрозольного облака и заземленной плоскостью на высотах до 0,4 м над горизонтальной заземленной плоскостью на расстоянии от 1,0 до 2,0 м от соплового устройства электрическое поле имеет практически квазиоднородный характер. Таким образом, расположенные в этой области стержневые электроды высотой до 0,4 м будут находиться в близких условиях с точки зрения воздействия

^{1 -} ось струи заряженного аэрозоля; 2 - границы струи заряженного аэрозоля

на них электрического поля облака заряженного аэрозоля.

Схема экспериментального исследовательского комплекса, задействованная при экспериментах, показана на рис. 2.



Рисунок 2 – Схема экспериментального комплекса: 1 – генератор заряженного аэрозоля конденсационного типа, 2 – заземленные электростатические экраны, 3 – облако заряженного аэрозоля, 4 – электрод, 5 – искровой разряд, 6,7 – малоиндуктивные шунты, 8,9 – цифровые запоминающие осциллографы Tektronix TDS 3054B и Tektronix DPO 7254, 10 – генератор запуска Г5-15, 11 – система ФЭУ-37, 12 – цифровой фотоаппарат марки Panasonic DMC-50, 13 – ФЭУ-79, 14 – электронно-оптическая камера K-011

Измерительная часть экспериментального комплекса включает в себя мало индуктивные токовые шунты (номиналом 0,5 и 1,0 Ом) для измерения тока разряда с заряженного аэрозольного облака на стержневой электрод с помощью цифрового запоминающего осциллографа марки Tektronix TDS 3054 или марки Tektronix DPO 7254.

Программируемая 9-кадровая электронно-оптическая камера K011 использовалась для регистрации картины развития разряда из искусственного облака заряженного аэрозоля и поражения им моделей объектов на заземленной плоскости в спектральном диапазоне от 400 до 800 нм одновременно с токовыми характеристиками. Эта камера обеспечивала длительность каждого кадра и между кадрового интервала от 0,1 до 102,4 мкс с минимальным шагом до 0,1 мкс. Общая картина разряда регистрировалась цифровыми фотоаппаратами Panasonic DMC-50. Запуск всего измерительного комплекса осуществляется генератором запуска Г5-15, сигнал на который подавался с фотоэлектронного умножителя. Цифровой фотоаппарат используется в режиме ручной выдержки (до 30 с) и запускается вместе с началом процесса зарядки искусственного облака, что дает возможность запечатлеть все стадии развития разряда.

На цифровой запоминающий осциллограф Tektronix DPO 7254 регистрируемый оптический сигнал подается с фотоэлектронного умножителя ФЭУ-79, который установлен в аэрозольной камере и фиксирует общее излучение всего разряда. На осциллограф Tektronix TDS 3054B сигнал подается с системы из трех фотоэлектронных умножителей (ФЭУ-37), которые оборудованы специальными щелями и фиксируют излучение из определенной, очень ограниченной по размерам области пространства между облаком заряженного аэрозоля и электродной системой на заземленной плоскости.

2 Экспериментальное исследование влияния характеристик моделей сосредоточенных объектов на поражения их разрядом из облака заряженного аэрозоля

Экспериментальное исследование влияния характеристик моделей сосредоточенных объектов на поражение их разрядом из облака заряженного водного аэрозоля проводились путем моделирования защиты сосредоточенного объекта одиночным стержневым молниеотводом. При моделировании объект и молниеотвод представлялись стержневыми электродами, расположенными на поверхности заземленного электростатического экрана под облаком заряженного аэрозоля на расстоянии от 1,3 до 1,6 м в области, где электрическое поле, созданное облаком, имело квазиоднородный характер. При физическом моделировании процессов поражения молнией моделей объектов и сопоставлении результатов экспериментов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащищенности различных энергетических объектов масштабирование было выполнено в соотношении 1:100.

В ходе экспериментов со стержневыми электродами варьировались высота модели защищаемого объекта и высота модели молниеотвода, радиус кривизны вершины модели молниеотвода и модели объекта, расстояние между моделями объекта и молниеотвода.

Было выполнено несколько серий экспериментов: 1) при одинаковых радиусах кривизны вершины моделей объекта (МО) и молниеотвода (ММ); 2) для случаев, когда радиус кривизны вершины модели молниеотвода существенно меньше радиуса кривизны вершины модели объекта. Во всех сериях для каждой конкретной конфигурации моделей объектов и молниеотводов в ходе экспериментов было получено не менее семисот случаев возникновения канального разряда в промежутке «облаков заряженного аэрозоля – система электродов на заземленной плоскости.



Рисунок 3 – Определение вероятности поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели стержневого молниеотвода и модели защищаемого объекта



Рисунок 4 – Покадровая развертка процесса поражения разрядом модели стержневого молниеотвода (размер кадра 70×70 см, длительность кадра 2 мкс, междукадровая пауза 0,1 мкс)



Рисунок 5 – Определение вероятности поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели стержневого молниеотвода и модели защищаемого объекта



Рисунок 6 – Покадровая развертка процесса поражения разрядом модели сосредоточенного объекта (размер кадра 70×70 см, длительность кадра 2 мкс, междукадровая пауза 0,1 мкс)

Типичная картина поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели молниеотвода в промежутке «облако заряженного аэрозоля – модели сосредоточенного объекта и стержневого молниеотвода на заземленной плоскости» показана на рис. 3. Покадровая развертка процесса поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели молниеотвода показана на рис. 4.

Типичная картина поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели сосредоточенного объекта в промежутке «облако заряженного аэрозоля – модели сосредоточенного объекта и стержневого молниеотвода на заземленной плоскости» показана на рис. 5. Покадровая развертка процесса поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели сосредоточенного объекта показана на рис. 6.

При экспериментальных исследованиях поражения моделей энергетических объектов разрядом из облака заряженного аэрозоля учитывались все канальные разряды в промежутке «облако заряженного аэрозоля – система заземленных электродов на плоскости», которые были подразделены на два вида: «Т» – разряды, не перешедшие после поражения модели объекта или молниеотвода в ярко выраженную главную стадию разряда; «Я» - разряды, поражение объектов которыми сопровождалось главной стадией разряда, характеризующейся мощным свечением канала разряда.

В случае, когда радиусы кривизны вершины модели объекта и модели молниеотвода были одинаковы $r_{\rm M} = r_{\rm ob}$, эксперименты были выполнены для нескольких вариантов расстояния между моделями объекта и молниеотвода. При этом, в каждой серии высота модели объекта не изменялась, а высота модели молниеотвода увеличивалась. Для сравнения полученных результатов использовался так называемый угол защиты стержневого молниеотвода α , который определялся следующим образом:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{a}{h_m - h_o}, \qquad (1)$$

где α – угол, образованный линией, проходящей через вершину молниеотвода и вершину объекта и осью молниеотвода; a – расстояние между моделью молниеотвода и моделью объекта; h_m – высота модели молниеотвода; h_o – высота модели объекта.

В первой серии экспериментов расстояние между моделями молниеотвода и объекта a = 18,5 см, радиус кривизны вершины модели молниеотвода и модели объекта 2,0 см, высота модели защищаемого объекта 19,5 см. Экспериментальные результаты, полученные для этой серии, и рассчитанные на их основе вероятности поражения модели объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля, представлены в табл. 1. Зависимость вероятности поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля, представлены в табл. 2. Зависимость вероятности поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля от угла защиты стержневого молниеотвода α показана на рис. 7.

Во второй серии экспериментов: расстояние между моделями молниеот-

вода и объекта: *a* = 13,5 см; радиус кривизны вершины модели молниеотвода и модели объекта 2,3 см; высота модели защищаемого объекта 17,0 см.

разрядом из облака заряженного аэрозоля в случас $\Gamma_{\rm M}$ Γ_{00} 2,0 см									
Высота М	М, см	31,0	33,5	36,0	38,0	40,0	42,0	45,0	48,0
Угол защи град	ты α,	58,1	52,9	48,3	45,0	42,1	39,4	36,0	33,0
Число	Т	54	34	30	10	10	8	4	1
разрядов	Я	90	59	32	14	10	6	2	1
в МО	R+T	144	93	62	24	20	14	6	2
Число	Т	246	162	198	254	478	476	469	438
разрядов	Я	466	471	550	456	690	562	482	529
в ММ	R+T	712	633	748	710	1168	1038	951	957
Всего разр	рядов	856	726	810	734	1188	1052	957	959
Вероят-	Т	0,1800	0,1734	0,1316	0,0379	0,0205	0,0165	0,0085	0,0023
ражения	Я	0,1618	0,1113	0,0550	0,0298	0,0143	0,0106	0,0041	0,0019
МО раз- рядом	R+T	0,1682	0,1281	0,0765	0,0327	0,0168	0,0133	0,0061	0,0020

Таблица 1 – Поражение моделей стержневого молниеотвода и объекта разрядом из облака заряженного аэрозодя в случае г = г c = 2.0 см



Рисунок 7 – Вероятность поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля при $r_{\rm M} = r_{\rm ob} = 2,0$ см:

 вероятность поражения модели объекта разрядами «Т», 2 – вероятность поражения модели объекта разрядами «Я», 3 – общая вероятность поражения модели объекта

Таблица 2 – Поражение моделей стержневого молниеотвода и объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля в случае $r_{M} = r_{ob} = 2,3$ см

For Part 1					J M	00)	-
Высота ММ, см	28,0	30,0	32,0	34,0	36,0	38,0	40,0
Угол защиты α, градусов	50,0	46,1	42,0	38,5	35,4	32,7	30,4
Число разрядов в МО	108	22	12	6	2	1	1
Число разрядов в ММ	952	1120	1528	1293	1383	1412	1898
Всего разрядов	1060	1142	1540	1299	1385	1413	1899
Вероятность МО поражения раз- рядом из облака	0,1019	0,0193	0,0078	0,0046	0,0014	0,0007	0,0005



Рисунок 8 – Вероятность поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля при $r_{\rm M}=r_{\rm of}=2,3$ см

Экспериментальные результаты, полученные для этой серии, и рассчитанные на их основе вероятности поражения модели разрядом из облака заряженного аэрозоля, представлены в табл. 2. Зависимость вероятности поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного водного аэрозоля от угла защиты модели стержневого молниеотвода α показана на рис. 8.

Несколько серий экспериментов были выполнены для моделирования часто встречающейся при молниезащите энергетических объектов ситуации,

когда радиус кривизны вершины стержневого молниеотвода существенно меньше возможных радиусов кривизны вершины защищаемых объектов ($r_{\rm M} < r_{\rm ob}$).

В первой серии экспериментов для такого соотношения между параметрами моделей стержневого молниеотвода и защищаемого объекта было принято следующее: расстояние между моделями молниеотвода и объекта составляло 18,5 см; радиус кривизны вершины модели молниеотвода 0,4 см и модели объекта 2,0 см, соответственно; высота модели защищаемого объекта 19,5 см. Экспериментальные результаты, полученные для этой серии экспериментов, и рассчитанные на основе полученных экспериментальных данных вероятности поражения модели разрядом из облака, представлены в табл. 3.

	1		-	5	M 00) 00	, ,
Высота ММ	1, см	36,0	38,0	40,0	42,0	44,5	47,5	50,0
Угол защиты α, градусов		48,3	45,0	42,1	39,4	36,5	33,5	30,4
II.	Т	95	73	71	22	14	10	5
число раз-	Я	70	77	66	16	14	8	4
рядов в мо	R+T	165	150	137	38	28	18	9
Harona noo	Т	345	363	417	352	362	308	390
число раз-	Я	192	262	402	480	476	376	362
рядов в мім	R+T	537	625	819	832	838	684	752
Всего разря	ядов	702	775	956	870	866	702	761
Вероятность	Т	0,2159	0,1674	0,1455	0,0588	0,0372	0,0314	0,0127
МО разря-	Я	0,2671	0,2271	0,1410	0,0322	0,0286	0,0208	0,0109
дом из обла- ка	R+T	0,2350	0,1935	0,1433	0,0437	0,0323	0,0256	0,0118

Таблица 3 – Поражение моделей стержневого молниеотвода и объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля в случае $r_{M} < r_{ob}$ ($r_{M} = 0,4$ см; $r_{ob} = 2,0$ см)

Зависимость вероятности поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля от угла защиты стержневого молниеотвода α показана на рис. 9.

Как видно из полученных результатов, на зависимостях вероятности поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного водного аэрозоля можно выделить несколько участков. При углах защиты модели молниеотвода более 40° (когда радиус кривизны вершины молниеотвода существенно меньше радиуса кривизны вершины модели защищаемого объекта) или более 45° (когда радиус кривизны вершины молниеотвода практически равен радиусу кривизны вершины модели защищаемого объекта) наблюдается резкий рост вероятности поражения модели объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля. Зона его защиты очень сильно уменьшается как по площади, так и в объеме, то есть он фактически перестает выполнять свое главное функциональное назначение – защиту от прямых ударов молнии (в данном случае от разрядов из искусственного облака заряженного водного аэрозоля).





1 – вероятность поражения модели объекта разрядами «т», 2 – вероятность поражения модели объекта разрядами «Я», 3 – общая вероятность поражения модели объекта

При углах защиты модели стержневого молниеотвода от 40 до 30° во всех случаях наблюдается практически пропорциональное снижение вероятности поражения модели объекта с уменьшением угла защиты. При углах защиты модели стержневого молниеотвода менее 30° , вероятность поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля становится менее 0,01.

Результаты экспериментальных исследований с применением моделей стержневых молниеотводов и сосредоточенных объектов показали существенное влияние соотношения радиусов кривизны вершины моделей объекта и стержневого молниеотвода на вероятность поражения модели объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля. Для случаев, когда радиус кривизны вершины модели стержневого молниеотвода существенно меньше радиуса кривизны вершины модели объекта, наблюдается существенное увеличение вероятности поражения модели объекта по сравнению со случаями, когда радиусы кривизны вершины моделей объектов и молниеотводов приблизительно равны (рис. 10).



Рисунок 10 – Вероятность поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака:

1 – вероятность поражения модели объекта при $r_{\rm m} < r_{\rm o6}$ ($r_{\rm m} = 0,4$ см; $r_{\rm o5} = 2,0$ см), 2 – вероятность поражения модели объекта при $r_{\rm m} = r_{\rm o5} = 2,0$ см

Таким образом, уменьшение радиуса кривизны вершины модели стержневого молниеотвода в пять раз приводит к росту вероятности поражения модели объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля от трех до пяти раз.

Для того чтобы выяснить влияние радиуса кривизны вершины модели стержневого молниеотвода на вероятность поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели защищаемого объекта была выполнена специальная серия экспериментов при следующих условиях: расстояние между моделями молниеотвода и объекта 13,5 см; радиус кривизны вершины модели объекта 2,3 см; высота модели защищаемого объекта 17,0 см; высота модели объекта 2,3 см; высота модели защищаемого объекта 17,0 см; высота модели объекта 2,3 см; высота модели объекта 2,00 см. Экспериментальные результаты, полученные для этой серии, и рассчитанные на их основе вероятности поражения модели защищаемого объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля, представлены в табл. 4.

Зависимость вероятности поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного водного аэрозоля от радиуса кривизны вершины модели молниеотвода показана на рис. 11. При уменьшении радиуса кривизны вершины модели стержневого молниеотвода менее 0,7 см наблюдается резкий рост вероятности поражения модели защищаемого объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля. Это объясняется тем, что при малых радиусах кривизны вершины молниеотвода на его вершине сильно усиливается внешнее электрическое поле, что приводит к раннему появлению коронного разряда, который, в значительной мере, экранирует вершину молниеотвода от действия электрического поля облака заряженного аэрозоля и нисходящего отрицательного лидера.

Таблица 4 – Поражение моделей стержневого молниеотвода и объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля в случае изменения радиуса вершины модели модниеотвода

		, ,						
Радиус кривиз- ны вершины MM, см	0,1	0,3	0,5	0,7	1,2	1,5	2,0	2,3
Число разрядов в МО	672	421	189	120	64	46	27	22
Число разрядов в ММ	102	320	550	702	657	706	953	1120
Всего разрядов	774	741	739	822	721	752	980	1142
Вероятность поражения МО	0,8682	0,5681	0,2558	0,1460	0,0888	0,0611	0,0276	0,0193



Рисунок 11 – Вероятность поражения модели сосредоточенного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля при изменении радиуса кривизны вершины модели молниеотвода

В результате, суммарное поле вблизи вершины молниеотвода становится меньше, и ухудшаются условия для старта с вершины молниеотвода восходящего встречного лидера. Все это значительно увеличивает вероятность появления разряда с вершины электрода с большим радиусом кривизны вершины (модели защищаемого молниеотводом объекта) и, соответственно, вероятность поражения модели защищаемого объекта разрядом из искусственного облака заряженного водного аэрозоля.

Оптимальный с точки зрения условий формирования лидерного разряда с вершины модели молниеотвода радиус кривизны его вершины находится в диапазоне от 2,0 до 2,5 см. В этом случае достигается наименьшая вероятность поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля защищаемой им модели объекта. При таких размерах вершины модели стержневого молниеотвода значительно увеличивается площадь поверхности электрода, на которой создаются условия для возникновения и последующего распространения восходящего или встречного лидерного разряда с модели молниеотвода. Фактически, это означает рост числа точек возможного старта лидерного разряда с вершины модели молниеотвода.

Дальнейшее увеличение радиуса кривизны вершины стержневого молниеотвода может оказаться не эффективным, так в этом случае коэффициент усиления электрического поля на вершине электрода будет относительно небольшим, и условия для формирования с него встречного (восходящего) лидера потребует достаточно сильного внешнего электрического поля. В результате, может наблюдаться задержка со стартом лидерного разряда с вершины молниеотвода, во время которой может успеть сформироваться восходящий разряд с защищаемого объекта. В этом случае защитное действие молниеотвода в этом случае станет менее эффективным.

3 Сопоставление результатов экспериментов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащиты объектов

Для сопоставления результатов экспериментов с действующими методиками определения молниезащищенности различных энергетических объектов были выполнены расчеты по молниезащите стержневым молниеотводом, используя действующие нормативные документы по молниезащите: Инструкцию по устройству молниезащиты зданий и сооружений РД 34.21.122-87 [3], Инструкцию по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций СО 153-34.21.122-2003 [4], Стандарт международной электротехнической комиссии МЭК 62305 Молниезащита [6], Расчеты проводились при масштабировании условий эксперимента к расчетным характеристикам в соотношении 1:100.

В сводной табл. 5 приведены экспериментальные результаты и расчетные данные, полученные по различным нормативным документам по молниезащите.

Сравнивая полученные результаты, нужно выделить влияние формы молниеотвода на его защищающую способность. Согласно различным нормативным документам при расчетах зон защиты форма вершины молниеотвода не учитывается. Однако форма вершины вносила существенное влияние число поражений объекта: при различных высотах надежность стержневого молниеотвода со сферической вершиной превосходила надежность остроконечного молниеотвода. Так, при высотах молниеотвода 36 и 38 м, когда объект попадал в зону защиты с надежностью Q = 0,95, экспериментальная надежность защиты соответствовала ей только в случае равных сферических вершин моделей объекта и молниеотвода. Причем, разница в вероятности поражения объекта, защищенного молниеотводом с разными вершинами, могла достигать почти порядка величины.

Высота	Вероятности по	Эксперименталь-							
молние-	молнии (согласно	о действующим	нормативным	ная вероятность					
отвода,		документам)		поражени	поражения объекта				
М	по [3]	по [4]	по [6]	1 серия	2 серия				
31	> 0,05	> 0,1	от 0,05 до 0,1	0,168	-				
33,5	от 0,005 до 0,05	> 0,1	от 0,05 до 0,1	0,128	-				
36	от 0,005 до 0,05	> 0,1	от 0,05 до 0,1	0,077	0,235				
38	от 0,005 до 0,05	> 0,1	от 0,05 до 0,1	0,033	0,194				
40	от 0,005 до 0,05	от 0,01 до 0,1	от 0,05 до 0,1	0,017	0,143				
42	< 0,005	от 0,01 до 0,1	от 0,05 до 0,1	0,013	0,044				
44,5	< 0,005	от 0,01 до 0,1	от 0,05 до 0,1	-	0,032				
45	< 0,005	от 0,01 до 0,1	от 0,05 до 0,1	0,006	-				
47,5	< 0,005	от 0,01 до 0,1	от 0,05 до 0,1	-	0,026				

Таблица 5 – Сводная таблица результатов определения вероятности поражения объекта разрядом

В случаях относительно невысокого молниеотвода (высотой 31,5 и 33,5 м) моделируемый в экспериментальных исследованиях сосредоточенный объект даже не попал ни в одну из построенных нормативных зон защиты, что подтвердилось в эксперименте: P = 0,168 и P = 0,128, соответственно.

В целом, эксперимент дал результаты, более близкие к расчетам по [3] для первой серии экспериментов. Результаты второй экспериментальной серии были ближе к расчетам, выполненным согласно [4].

В общем же в большинстве случаев опытная вероятность поражения объекта соответствовала зоне защиты, в которую попадал объект в результате построения. Однако, как правило, эта зона соответствовала наименьшей надежности защиты, то есть зоне в которой допустим наибольший разброс значений вероятности поражения объекта (от 0,005 до 0,050 для [3] и от 0,01 до 0,10 для [4]). В случаях, когда согласно расчету объект должен был входить в более надежную зону защиты, были получены существенные отклонения от нее при экспериментах, особенно для молниеотводов без сферической вершины.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования процес-

сов поражения моделей энергетических объектов разрядом из облака заряженного аэрозоля и их сопоставление с существующими расчетными методами определения молниезащищенности объектов позволяют сформулировать следующее.

1) Существующие нормативные документы по молниезащите при расчетах зоны защиты и определении вероятности прорыва молнии в зону защиты стержневых молниеотводов фактически оперируют только высотой стержневого молниеотвода, но никак не учитывают форму его вершины (молниеприемника). В подавляющем большинстве случае молниеприемник представляет собой острый металлический стержень, для которого нормируется только минимальное поперечное сечение с точки зрения обеспечения протекания по нему тока молнии.

В тоже время экспериментальные исследования процесса поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля моделей сосредоточенных объектов и стержневых молниеотводов показали, что защитное действие модели стержневого молниеотвода уменьшается, если он имеет маленький радиус кривизны вершины. Это связано с тем, что на острой вершине молниеотвода будет большой коэффициент усиления электрического поля, поэтому быстро будет возникать коронный разряд, который будет создавать вблизи вершины молниеотвода объемный заряд, ограничивающий внешнее поле вблизи вершины и, соответственно, затрудняющий возникновение с молниеотвода встречного или восходящего лидерного разряда.

Эксперименты показали, что есть оптимальный диапазон размеров (радиусов кривизны) вершины стержневого молниеотвода, при которых обеспечиваются лучшие условия для старта с него лидера. Он находится в диапазоне от 2,0 см до 4,0 см. Стримерная корона, которая будет возникать на вершине стержневого молниеотвода с таким радиусом, будет иметь характеристики, способствующие ее быстрому переходу в лидерный разряд [13, 15-17].

2) Экспериментальные исследования показали, что поражение моделей объектов и молниеотводов является конкурирующим процессом. Во многом, конечная точка поражения определяется тем, с какого электрода раньше возникнет встречный (восходящий) лидерный разряд. Поэтому надо обращать внимание не только на форму вершины стержневого молниеотвода, но и на выступающие части самих защищаемых объектов. Значительная часть из них может иметь эквивалентные радиусы кривизны как раз в том диапазоне величин, когда создаются условия, оптимальные для старта оттуда встречного (восходящего) лидера в поле грозового облака и нисходящего лидера молнии.

Заключение. Проведены экспериментальные исследования и физическое моделирование процессов поражения молнией моделей сосредоточенных объектов для исследования эффективности их молниезащиты с использованием искусственных заряженных аэрозольных облаков. Экспериментально определены вероятности поражения и зоны защиты моделей молниеотводов. Исследовано влияние характеристик моделей молниеотводов и объектов на процесс их поражения разрядом из облака. Найдено существенное влияние соотношения размеров (радиусов кривизны вершины сосредоточенных объектов и стержневых молниеотводов) на вероятность поражения модели объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля и размер зоны защиты молниеотвода.

Для случаев, когда радиус кривизны вершины модели стержневого молниеотвода существенно меньше радиуса кривизны вершины модели объекта, наблюдается существенное увеличение вероятности поражения модели объекта по сравнению со случаями, когда радиусы кривизны вершины моделей объектов и молниеотводов приблизительно равны. Оптимальный с точки зрения условий формирования лидерного разряда с вершины модели молниеотвода радиус кривизны его вершины находится в диапазоне от 2,0 см до 4,0 см. В этом случае достигается наименьшая вероятность поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля защищаемой им модели объекта. Установлено, что при таких размерах вершины модели стержневого молниеотвода также значительно увеличивается площадь поверхности электрода, на которой создаются условия для возникновения и последующего распространения восходящего или встречного лидерного разряда с модели молниеотвода.

Выполнено сопоставление экспериментальных результатов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащиты различных энергетических объектов, используя действующие нормативные документы по молниезащите. Проведенные расчеты с масштабированием условий экспериментов в соотношении 1:100 показали, что для стержневых молниеотводов в большинстве случаев экспериментальная вероятность поражения объекта соответствовала зоне защиты, в которую попадал объект по результатам расчетов. Но, как правило, эта зона соответствовала наименьшей надежности защиты, то есть зоне, в которой допустим наибольший разброс значений вероятности поражения объекта. Особенно большие отличия между расчетными и экспериментальными данными были для случаев моделей стержневых молниеотводов с острой вершиной.

Список литературы: 1. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 2. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: Physics and Effects. – Cambridge University Press, 2003. 3. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений РД 34.21.122-87. – М: Энергоатомиздат, 1989. 4. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций: CO – 153 – 34.21.122-2003. – М.: МЭИ, 2004. 5. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. – С.-Пб.: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. 6. IEC Standard 62305-1. Protection against lightning - Part I: General principles. 2005. 7. P. Laroche Recent progress and open questions on the physics of lightning // Proceedings of 13th International Conference on Atmospheric Electricity. – Beijing, China, 2007. 8. L. Arevalo, V. Cooray 'The mesh method' in lightning protection standards – Revisited // Journal of Electrostatics. – 68 (2010). – P. 311-314. 9. V. Rakov A Review of Triggered-Lightning Experiments // Proceedings of 30th International Conference on Lightning Protection. – Cagliari, Italy, 2010. 10. C. Bouauegneau A critical view on the lightning protection international standard // Journal of Electrostatics. -65 (2007). – Р. 395-399. 11. Александров Г.Н. Физические основы моделирования разрядов молнии при лабораторных исследованиях молниезащиты // Труды Первой Российской конференции по молниезащиту. - Новосибирск, 2007. - С. 63-70. 12. Гайворонский А.С., Овсянников А.Г. Методы физического моделирования грозопоражаемости наземных объектов // Труды Первой Российской конференции по молниезащите. - Новосибирск, 2007. - С. 85-90. 13. А.Г. Темников, А.В. Орлов Экспериментальное исследование характеристик стебля стримерной короны с использованием искусственного облака заряженного водного аэрозоля // Электричество. – № 12. – 2005. – С. 14-21. 14. Темников А.Г., Орлов А.В., Соколова М.В., Синкевич О.А., Фирсов К.Н., Василяк Л.М. и др. Исследование электрических разрядов вблизи искусственного заряженного аэрозольного облака и их взаимодействие с лазерной искрой // Теплофизика высоких температур. – Т. 41, № 2. – 2003. – C. 200-210. 15. F. Rizk Switching impulse strength of air insulation: leader inception criterion // IEEE Transactions on Power Delivery. - Vo. 4, no. 4. - 1989. - P. 2187-2195. 16. I. Gallimberti The mechanism of long spark formation // J. Physique Coll. - Vol. 40, No. C7. - 1972. - P. 193-250. 17. 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. - P. 897-908. Поступила в редколлегию 24.10.2011

УДК 621.311

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

Л.Л.ЧЕРНЕНСКИЙ, ст. преп., Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

А.В.ОРЛОВ, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Т.К.ГЕРАСТЕНОК, студент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

О.С.БЕЛОВА, студент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ОБЛАКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА МОДЕЛЯХ

Представлено результати експериментальних досліджень і фізичного моделювання процесів ураження блискавкою моделей енергетичних об'єктів та дослідження ефективності їх блискавкозахисту з використанням штучних заряджених аерозольних хмар. Проаналізовано вплив характеристик моделей тросових блискавковідводів і проводів на процес їх ураження розрядом із хмари зарядженого аерозолю. Виконано порівняння експериментальних результатів з розрахунковими та експериментальними методиками визначення блискавкозахисту енергетичних об'єктів. Вироблені рекомендації щодо вдосконалення блискавкозахисту існуючих і проектованих енергетичних об'єктів. Results of the experimental investigations and physical simulation of the processes of lightning affection of the power energy objects and the investigation of its lightning protection effectiveness using artificial charged aerosol clouds are presented. Influence of the characteristics of lightning conductor and phase wire models on the process of their affection by the discharge from charged aerosol has been analyzed. Comparison of the experimental results with the calculated and experimental methods of determination of the power energy object lightning protection has been fulfilled. Recommendations on the improvement of lightning protection of the existing and projecting power energy objects have been proposed.

Представлены результаты экспериментальных исследований и физического моделирования процессов поражения молнией моделей энергетических объектов и исследования эффективности их молниезащиты с использованием искусственных заряженных аэрозольных туч. Проанализировано влияние характеристик моделей тросовых молниеотводов и проводов на процесс их поражения разрядом из тучи заряженного аэрозолю. Выполнено сравнение экспериментальных результатов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащиты энергетических объектов. Выработаны рекомендации по совершенствованию молниезащиты существующих и проектируемых энергетических объектов.

Введение. Остается еще много существенных проблем в физике разряда молнии [1], таких как инициирование разряда молнии, процессы перехода от лидерной стадии к главному разряду, формирование внутриоблачной молнии, электромагнитное излучение вспышки молнии и его связь с процессами в грозовом облаке и характеристиками разряда молнии. Одной из таких проблем является и формирование встречных и восходящих разрядов с объектов в поле грозового облака и нисходящего лидера молнии.

Современные расчетные методики определения молниезащищенности энергетических объектов, которые оценивают вероятность поражения их молнией и базируются на нахождении зон защиты молниеотводов, в качестве одного из главных факторов используют возможность возникновения встречных лидеров с объектов. Проверка этих методик многолетними наблюдениями за процессами поражения объектов разрядами молнии в естественных условиях трудна из-за ограниченности и неоднозначности собранного материала, малой статистической выборки и дороговизны.

Существующие нормативные методики расчета и определения молниезащищенности различных объектов [2-5], основывающиеся на таком подходе, часто расходятся в своих оценках на порядок величины и более. Это связано с тем, что до сих пор нет четкого и однозначного представления о процессе формирования молнии и поражению ею наземных объектов. Выявлению физической картины формирования восходящего лидерного разряда с наземного объекта и построению на ее основе физико-математической модели все последние десятилетия уделяется много внимания [1, 6-8]. Однако целостной общепринятой модели этого процесса пока не создано.

В большинстве случаев просто упрощают задачу в стандартах и инженерных методиках (например, [9]), что ведет не только к существенным погрешностям при оценке, но и к физически мало обоснованным результатам. Определение условий и тенденций того, как и какие характеристики самого объекта влияют на вероятность поражения его разрядом молнии, в настоящее время является одним из основных направлений в области физики молнии и молниезащиты [9, 10]. В результате, проблема совершенствования действующих стандартов по молниезащите и методик расчета молниепоражаемости наземных объектов остается актуальной [11].

Использование экспериментальных методов для исследования физики молнии и молниезащиты являлось и является актуальным [6, 7], так как без них невозможно детально проверить и проанализировать возможную эффективность действующих и перспективных средств защиты от прямых ударов молнии и ее вторичных воздействий. Поэтому не потеряли своей актуальности и развиваются методы физического моделирования разрядов молнии, особенно для решения проблем молниезащиты объектов [6, 7, 12].

Среди методов выделяется моделирование на макетах объектов с использованием длинной отрицательной искры в качестве аналога лидера молнии и имитация восходящих встречных разрядов с объектов [13]. Но в методах экспериментального моделирования поражения разрядом молнии моделей объектов с использованием генераторов импульсных напряжений условия эксперимента все-таки достаточно далеки от реальной грозовой обстановки, в которой всегда присутствует сильное электрическое поле самого грозового облака и своеобразно меняющееся поле отрицательного нисходящего ступенчатого лидера молнии. Кроме этого, многие нюансы процесса поражения молнией реальных объектов (например, конкурентное развитие восходящих лидерных разрядов, коронирование элементов конструкции объектов и взаимное влияние этого процесса на заряженное облако для высоких объектов и др.) в них практически не моделируются.

Одним из направлений при экспериментальном определении вероятности поражения объектов разрядом молнии может являться использование искусственных сильно заряженных аэрозольных водных облаков. Существующие методы создания искусственных заряженных аэрозольных облаков позволяют создавать облака объемом до десяти кубических метров и потенциалом в несколько мегавольт. Использование искусственных заряженных аэрозольных облаков открывает новые возможности при экспериментальном моделировании процесса поражения объекта молнией, существенно приближает физическое моделирование процесса поражения молнией наземных объектов к естественной грозовой обстановке без нанесения повреждений реальным объектам, дает возможность получить достаточный для анализа статистический материал.

Это открывает новые возможности при экспериментальном моделировании процесса поражения объекта молнией. Во-первых, это существенно приближает физическое моделирование процесса поражения молнией наземных объектов к естественной грозовой обстановке. Во-вторых, такой подход может значительной упростить экспериментальное моделирование процесса поражения молнией наземных объектов и даст возможность получать достаточный для анализа статистический материал, повысить надежность и безопасность эксплуатации существующих и проектируемых энергетических объектов путем выработки рекомендаций по дальнейшему совершенствованию их молниезащиты.

1 Экспериментально-измерительный комплекс для физического моделирования процессов поражения молнией энергетических объектов и исследования эффективности их молниезащиты

Экспериментальный комплекс состоит из аэрозольной камеры размером объемом около 500 кубических метров, генератора заряженного аэрозоля (ГЗА), исследуемой электродной системы и измерительного комплекса. Основные параметры экспериментально-измерительного комплекса представлены в [14, 15].



Рисунок 1 – Распределение напряженности электрического поля в вертикальном сечении промежутка «облако заряженного аэрозоля – заземленная плоскость», проходящем через ось заряженной струи:

1 - ось струи заряженного аэрозоля; 2 - границы струи заряженного аэрозоля

Создаваемое аэрозольное облако имеет объем несколько кубических метров. Ток выноса при экспериментах составлял 120 мкА. Потенциал искус-

ственного облака заряженного водного аэрозоля достигает 1,5 MB. В результате, между заряженным аэрозольным облаком и заземленной плоскостью создается сильное электрическое поле напряженностью до 12 кВ/см вблизи заземленной плоскости и до 22 кВ/см на границе облака заряженного аэрозоля (рис. 1).

В области между нижней границей создаваемого заряженного аэрозольного облака и заземленной плоскостью на высотах до 0,4 м над горизонтальной заземленной плоскостью на расстоянии от 1,0 до 2,0 м от соплового устройства электрическое поле имеет практически квазиоднородный характер. Его величина меняется с высотой сравнительно медленно (растет с высотой не более чем на 30 %, от 10 кВ/см у самой плоскости до 14 кВ/см на высоте 0,4 м над ней). Таким образом, расположенные в этой области электроды высотой до 0,4 м будут находиться в близких условиях с точки зрения воздействия на них электрического поля облака заряженного аэрозоля.

Схема экспериментального исследовательского комплекса, задействованная при экспериментах, показана на рис. 2.



Рисунок 2 - Схема экспериментального комплекса:

1 – генератор заряженного аэрозоля конденсационного типа, 2 – заземленные
электростатические экраны, 3 – облако заряженного аэрозоля, 4 – электрод, 5 – искровой разряд, 6,7 – малоиндуктивные шунты, 8,9 – цифровые запоминающие осциллографы Tektronix TDS 3054B и Tektronix DPO 7254, 10 – генератор запуска Г5-15, 11 – система ФЭУ-37, 12 – цифровой фотоаппарат марки Panasonic DMC-50, 13 – ФЭУ-79, 14 – электронно-оптическая камера K-011

Измерительная часть экспериментального комплекса включает в себя мало индуктивные токовые шунты (номиналом 0,5 и 1,0 Ом) для измерения тока разряда с заряженного аэрозольного облака на модельные протяженные электроды с помощью цифрового запоминающего осциллографа марки Tektronix TDS 3054 или марки Tektronix DPO 7254.

Миниатюрная программируемая 9-кадровая электронно-оптическая камера K011 использовалась для регистрации оптической картины развития разряда из искусственного облака заряженного аэрозоля и поражения им моделей объектов на заземленной плоскости в спектральном диапазоне от 400 до 800 нм одновременно с токовыми характеристиками. Эта камера обеспечивала длительность каждого кадра и между кадрового интервала от 0,1 до 102,4 мкс с минимальным шагом до 0,1 мкс. Общая картина разряда регистрировалась цифровыми фотоаппаратами Panasonic DMC-50. Угол между направления обзора разрядного явления электронно-оптической камерой и цифровым фотоаппаратом составлял около 30°. Запуск всего измерительного комплекса осуществляется генератором запуска Г5-15, сигнал на который подавался с фотоэлектронного умножителя.

Таким образом, статическая оптическая картина разрядных процессов в промежутке «заряженное аэрозольное облако – система протяженных электродов на плоскости» и их формирование во времени могут фиксироваться цифровыми фотоаппаратами марки Panasonic DMC-50 и программируемой электронно-оптической камерой К-011. Цифровой фотоаппарат используется в режиме ручной выдержки (до 30 с) и запускается вместе с началом процесса зарядки искусственного облака от специализированного источника высокого напряжения, что дает возможность запечатлеть все стадии развития разряда.

На цифровой запоминающий осциллограф Tektronix DPO 7254 регистрируемый оптический сигнал подается с фотоэлектронного умножителя ФЭУ-79, который установлен в аэрозольной камере и фиксирует общее излучение всего разрядного явления. На осциллограф Tektronix TDS 3054B сигнал подается с системы из трех фотоэлектронных умножителей (ФЭУ-37), которые оборудованы специальными щелями и фиксируют излучение из определенной, очень ограниченной по размерам области пространства между облаком заряженного аэрозоля и электродной системой на заземленной плоскости.

2 Экспериментальное исследование влияния характеристик моделей протяженных объектов на поражения их разрядом из облака заряженного аэрозоля

Экспериментальное исследование влияния характеристик моделей протяженных объектов (проводов и тросов воздушной линии электропередачи) на поражение их разрядом из облака заряженного водного аэрозоля проводились путем моделирования защиты протяженного объекта (провода) одиночным тросовым молниеотводом. При моделировании объект и молниеотвод представлялись цилиндрическими электродами (металлическими проводами или трубами), расположенными над поверхностью заземленного электростатического экрана под облаком заряженного аэрозоля на расстоянии от 1,3 до 1,6 м перпендикулярно направлению распространения струи заряженного аэрозоля в области, где электрическое поле, созданное облаком, имело квазиоднородный характер. При физическом моделировании процессов поражения молнией моделей объектов и сопоставлении результатов экспериментов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащищенности различных энергетических объектов масштабирование воздушных линий электропередачи было выполнено в соотношении 1:100.

В ходе экспериментов с протяженными электродами варьировались высота модели защищаемого объекта (модели фазного провода) и высота модели молниеотвода (модели грозозащитного троса), радиус модели тросового молниеотвода и модели протяженного объекта, расстояние между моделями объекта и молниеотвода.

При экспериментальных исследованиях поражения моделей энергетических объектов разрядом из облака заряженного аэрозоля учитывались все канальные разряды в промежутке «облако заряженного аэрозоля – система заземленных электродов на плоскости»: «Т» – разряды, не перешедшие после поражения модели объекта или молниеотвода в ярко выраженную главную стадию разряда; «Я» – разряды, поражение моделей объектов или молниеотводов которыми сопровождалось главной стадией разряда, характеризующейся мощным свечением канала разряда.

При определении вероятности поражения модели энергетического объекта (MO) и защиты его от разрядов из облака заряженного аэрозоля моделью тросового молниеотвода (MM) было выполнено несколько серий экспериментов:

1) при одинаковых радиусах моделей провода и троса;

2) для случаев, когда радиус модели тросового молниеотвода существенно меньше радиуса модели фазного провода или ошиновки. Во всех сериях для каждой конкретной конфигурации моделей объектов и молниеотводов в ходе экспериментов было получено не менее семисот случаев возникновения канального разряда в промежутке «облаков заряженного аэрозоля – система электродов на заземленной плоскости».

Типичная картина поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели молниеотвода модели протяженного объекта (провода) в промежутке «облако заряженного аэрозоля – модели провода и тросового молниеотвода над заземленной плоскостью», показана на рис. 3. В случаях поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели фазного провода значительная часть таких разрядов концентрировалась в областях модели провода, прилегающих к местам, моделирующих опоры, на которых крепились модели фазных проводов (рис. 4). Именно этот участок модели фазного провода или другого протяженного объекта являлся основным местом «старта» восходящих



Рисунок 3 – Характерная картина поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели тросового молниеотвода и модели защищаемого объекта (провода)



Рисунок 4 – Характерная картина поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели защищаемого объекта (провода)



Рисунок 5 – Характерная картина поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели тросового молниеотвода

лидерных разрядов, которые приводили к последующему поражению модели протяженного объекта разрядом и облака заряженного аэрозоля. В отличие от характера поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модели фазного провода, поражения разрядом из облака модели тросового молниеотвода чаще проходило на центральном участке такого молниеотвода (рис. 5), где наблюдается большая напряженность электрического поля, создаваемого облаком, и создаются наиболее благоприятные условия для возникновения восходящего или встречного лидерного разряда.

При проведенных экспериментальных исследованиях варьировались высота моделей тросового молниеотвода и модели защищаемого провода, расстояние между протяженными объектами для того чтобы определить вероятность поражения защищаемого провода разрядом из заряженного аэрозольного облака в зависимости от угла защиты α модели тросового молниеотвода (рис. 6).

В первой серии экспериментальных исследований, когда радиусы модели защищаемого провода и модели тросового молниеотвода были одинаковы $r_{\rm M} = r_{\rm ob}$, высота подвеса защищаемого протяженного объекта и высота подвеса модели молниеотвода в рамках каждого экспериментального случая были постоянными и равнялись 11 и 20 см, соответственно. В ходе экспериментальных исследований этой серии изменялось только расстояние между моделями проводов и тросов. Радиус модели защищаемого провода в этой серии был равен радиусу модели тросового молниеотвода и составлял 1,8 см.



Рисунок 6 - Схематичное представление угла защиты тросового молниеотвода

Экспериментальные результаты, полученные для этой серии, и рассчитанные на их основе вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля, представлены в табл. 1. Зависимость вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного водного аэрозоля от угла защиты модели тросового молниеотвода α показана на рис. 7.

объекта разря	$_{\rm M}$ – 1,6 см								
Расстояние ме моделями тро провода, с	асстояние между юделями троса и провода, см		10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0	
Угол защить градусов	ια,	33,6	39,8	45,0	49,4	53,1	56,3	59,0	
Число разря-	Т	1	2	12	25	25	27	66	
дов в модель	Я	0	1	6	18	25	28	54	
объекта	R+T	1	3	18	43	50	55	120	
Число разря-	Т	634	494	474	426	385	360	264	
дов в модель	Я	401	361	312	306	310	342	366	
молниеотвода	R+T	1035	855	786	732	695	702	630	
Всего разряд	цов	1036	858	804	775	745	757	750	
Вероятность	Т	0,0016	0,0040	0,0247	0,0554	0,0609	0,0698	0,2000	
поражения молепи объ-	Я	0,0000	0,0028	0,0189	0,0556	0,0746	0,0757	0,1286	
екта	R+T	0,0009	0,0035	0,0224	0,0555	0,0671	0,0727	0,1600	

Таблица 1 – Поражение моделей тросового молниеотвода и протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля в случае $r_{M} = r_{ob} = 1.8$ см

Во второй серии проведенных экспериментов, когда радиус модели защищаемого фазного провода был существенно больше радиуса модели тросо-
вого молниеотвода $r_{\rm M} < r_{\rm o6}$ ($r_{\rm M} = 0.8$ см; $r_{\rm o6} = 1.8$ см), высота подвеса защищаемого протяженного объекта и высота подвеса модели тросового молниеотвода в рамках каждого экспериментального случая были постоянными и равнялись 12 и 20,5 см, соответственно.



Рисунок 7 — Вероятность поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля при $r_{M} = r_{ob} = 1,8$ см:

В ходе экспериментальных исследований этой серии изменялось только расстояние между моделями проводов и тросов. Радиус модели защищаемого провода в этой серии был равен 1,8 см, радиус модели тросового молниеотвода составлял 0,8 см.

Экспериментальные результаты, полученные для этой серии, и рассчитанные на их основе вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля, представлены в табл. 2.

Зависимость вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного водного аэрозоля от угла защиты модели тросового молниеотвода α показана на рис. 8.

В третьей серии экспериментов изменялись расстояние между моделями молниеотвода и объекта, высота модели защищаемого объекта и высота модели тросового молниеотвода. В отличие от предыдущих серий экспериментов в этой серии модели протяженных объектов и тросовых молниеотводов были выполнены не из жестких металлических труб, а из металлических гибких проводов.

вероятность поражения модели объекта разрядами «Т», 2 – вероятность поражения модели объекта разрядами «Я», 3 – общая вероятность поражения модели объекта

Таблица 2 – Поражение моделей тросового молниеотвода и протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля в случае $r_{M} < r_{of}$

Расстояние между моделями троса и провола см		9,0	11,0	13,0	15,0	17,0	19,0	21,0
Угол защиты α, гра- дусов		34,6	40,2	45,0	49,1	52,3	55,6	58,2
Число разря-	Т	1	1	1	1	2	12	62
дов в модель	Я	0	0	1	1	2	11	54
объекта	R+T	1	1	2	2	4	23	116
Число разря-	Т	723	683	502	404	311	388	346
дов в модель	Я	362	354	682	450	480	444	411
молниеотвода	R+T	1085	1037	1184	854	791	832	757
Всего разрядов		1086	1038	1186	856	795	855	873
Вероятность	Т	0,0014	0,0015	0,0020	0,0025	0,0064	0,0309	0,1792
поражения молели объ-	Я	0,0000	0,0000	0,0015	0,0022	0,0042	0,0248	0,1187
екта	R+T	0,0009	0,0010	0,0017	0,0023	0,0050	0,0269	0,1329

 $(r_{M} = 0.8 \text{ cm}; r_{00} = 1.8 \text{ cm})$



Рисунок 8 – Вероятность поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля при $r_{\rm M} < r_{\rm ob}$ ($r_{\rm m} = 0.8$ см; $r_{\rm ob} = 1.8$ см):



Радиус модели защищаемого фазного провода был существенно больше радиуса модели тросового молниеотвода $r_{M} < r_{of}$ ($r_{M} = 0,4$ см; $r_{of} = 1,0$ см). Экспериментальные результаты, полученные для этой серии, и рассчитанные на их основе вероятности поражения модели протяженного объекта (провода) разрядом из облака заряженного аэрозоля, представлены в табл. 3.

Зависимость вероятности поражения модели протяженного объекта (фазного провода) разрядом из облака заряженного водного аэрозоля от угла защиты модели тросового молниеотвода α показана на рис. 9.

Таблица 3 – Поражение моделей тросового молниеотвода и протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля в случае $r_{M} < r_{ob}$

)) ,	/		
Угол защиты α, гра- дусов	31,3	32,3	33,6	38,6	43,4	49,5
Число разрядов в мо- дель объекта	0	0	1	28	62	95
Число разрядов в мо- дель молниеотвода	893	840	1649	1064	983	650
Всего разрядов	893	840	1650	1092	1045	755
Вероятность пораже- ния разрядом из об- лака модели объекта	0,0000	0,000	0,0006	0,0256	0,0593	0,1258

$$(r_{M} = 0,4 \text{ cm}; r_{ob} = 1,0 \text{ cm})$$





Как видно из полученных экспериментальных результатов, на зависимостях вероятности поражения модели протяженного объекта (провода) разрядом из облака заряженного водного аэрозоля можно выделить общую тенденцию. При превышении определенного угла защиты модели тросового молниеотвода (от 32° для гибких моделей проводов и тросов до 50° для жестких моделей проводов и тросов) наблюдается существенный рост вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля. Зона его защиты очень быстро уменьшается по объему, т.е. он фактически перестает выполнять свое главное функциональное назначение – защиту провода от прямых ударов молнии (в данном случае от разрядов из искусственного облака заряженного водного аэрозоля). При углах защиты модели тросового молниеотвода менее 30° во всех случаях наблюдается снижение вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля до уровня менее 0,001.

Если проанализировать полученные экспериментальные результаты, то вероятность поражения модели провода разрядом из облака заряженного аэрозоля существенно зависит от следующих факторов (рис. 10): 1) от соотношения радиусов моделей поводов и тросовых молниеотводов; 2) от гибкого или жесткого варианта выполнения моделей проводов и тросов – вероятность поражения модели гибкого провода существенно выше.



Рисунок 10 – Вероятность поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля:

1 – вероятность поражения модели гибкого провода при $r_{\rm M} < r_{\rm o 0}$ ($r_{\rm M}$ = 0,4 см; $r_{\rm o 0}$ = 1,0 см), 2 – вероятность поражения модели жесткого провода при $r_{\rm M}$ = $r_{\rm o 0}$ = 1,8 см,

3 – вероятность поражения модели жесткого провода при $r_{\rm M}$ < $r_{\rm ob}$ ($r_{\rm M}$ = 0,8 см; $r_{\rm ob}$ = 1,8 см)

Есть оптимальные размеры (радиус) модели тросового молниеотвода, при которых обеспечивается наибольшая эффективность защиты модели протяженного объекта (провода). Они находятся в диапазоне от 0,7 до 1,1 см. При таких размерах модели тросового молниеотвода коэффициент усиления и характер распределения электрического поля вблизи модели троса создаются наиболее подходящие условия для старта с него восходящего (встречного) лидерного разряда и, соответственно, выполнения своего назначения. В то же время наблюдается существенное уменьшение эффективности защитного действия модели тросового молниеотвода при выполнении моделей из гибкого провода по сравнению с их жестким неподвижным вариантом.

3 Сопоставление результатов экспериментов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащиты объектов

Для сопоставления результатов экспериментов с действующими методиками определения молниезащищенности различных энергетических объектов были выполнены расчеты по молниезащите тросовым молниеотводом, используя действующие нормативные документы по молниезащите: Инструкцию по устройству молниезащиты зданий и сооружений РД 34.21.122-87 [2], Инструкцию по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций СО 153-34.21.122-2003 [3], Стандарт международной электротехнической комиссии МЭК 62305 Молниезащита [5], Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений [4].

Расчеты проводились при масштабировании условий эксперимента к расчетным характеристикам в соотношении 1:100.

В табл. 4 и 5 для сопоставления приведены экспериментальные результаты и расчетные данные, полученные по различным нормативным документам по молниезащите.

серия)						
Эксперимент N	по [2]	по [3]	Р _α (Эксперимент)			
1	<0,005	0,001	0,0009			
2	0,005<<0,05	0,01<<0,1	0,019			
3	0,05<	0,01<<0,1	0,056			
4	0,05<	0,01<<0,1	0,067			
5	0,05	0,01<<0,1	0,073			
6	0,05<<	0,1<	0,16			

Таблица 4 – Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов определения вероятности поражения протяженного объекта разрядом (первая

серия)

Как уже отмечалось ранее, для модели тросового молниеотвода была установлена тенденция существенного роста вероятности поражения объекта после превышения углом защиты троса определенного значения. И для обеих серий экспериментов наблюдается корреляция между экспериментальными и расчетными результатами в области углов защиты, не превышающих этого критического угла.

Таблица 5 – Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов определения вероятности поражения протяженного объекта разрядом (вторая серия)

eepini)							
Эксперимент N	по [2]	по [3]	Р _а (Эксперимент)				
1	0,005	0,001<	0,0009				
2	<0,005	0,001	0,001				
3	0,005	0,001<	0,002				
4	<0,005	0,001	0,003				
5	0,005<	0,01<<0,1	0,006				
6	0,05<	0,01<<0,1	0,027				
7	0.05<<	0,1<	0,133				

Выполним еще одно сопоставление полученных экспериментальных результатов с расчетами вероятности прорыва молнии к фазным проводам ВЛ.

Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту, то есть поражения фазного провода, может быть оценена в соответствии с опытом эксплуатации по эмпирической формуле

$$\lg P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_{on}}}{A} - B, \qquad (1)$$

где A = 90 и B = 4 – из анализа опыта эксплуатации линий 110-220 кВ; h_{on} – высота опоры, м; α – угол защиты, образованный вертикалью, проходящей через трос, и прямой, соединяющей трос с проводом.

Для типовых ВЛ 110-750 кВ при положительных углах защиты троса (трос расположен ближе к оси опоры, чем провод) вероятность прорыва молнии на фазный провод рекомендуется определять по эмпирической формуле [4]:

$$P_{\alpha} = \exp\left[\frac{1}{D_{U}}\left(3, 2\frac{\Delta d}{\Delta h}\sqrt{\frac{h_{mp}}{\Delta h}} - \frac{9}{D_{U}}\right)\right];$$
(2)

$$D_U = 1 + \frac{U_H}{100 \cdot \Delta h} \left(0.75 \frac{h_{mp}}{\Delta h} \frac{Q}{Q + Q_0} \right)^3;$$
(3)

$$Q_0 = 200^{\left(1+0,1\frac{U_H}{1000}\right)};$$
(4)

$$Q = \frac{U_H}{\ln \frac{2h_{cp.np}}{r_{np}}},$$
(5)

где U_{μ} – номинальное напряжение линии, кВ; Δh – разность высот подвеса провода и троса на опоре, м; Δd – смещение троса и провода по горизонтали, м; h_{mp} – высота подвеса троса на опоре, м; r_{np} – радиус провода (для расщепленной фазы – эквивалентный радиус r_3), м; $h_{cp,np}$ – средняя высота подвеса провода, м.

Формула (2) «работает» при относительно небольших углах защиты троса. Поэтому при больших углах защиты будет использоваться при сопоставлении экспериментальных и расчетных результатов формула (1).

Рассчитанная зависимость вероятности поражения модели провода от угла защиты троса вместе с экспериментальными результатами показана на рис. 11.



Рисунок 11 – Вероятность поражения модели протяженного объекта (фазного провода) разрядом из облака заряженного аэрозоля (молнией):
1 – вероятность поражения модели гибкого провода при r_M < r_{oб} (r_m = 0,4 см; r_{oб} = 1,0 см), 2 – вероятность поражения модели жесткого провода при r_M < r_{oб} = 1,8 см,
3 – вероятность поражения модели жесткого провода при r_M < r_{oб} (r_m = 0,8 см; r_{oб} = 1,8 см), 4 – вероятность поражения фазного провода, рассчитанная по (1) и (2)

При сравнении результатов, полученных в ходе расчета вероятности поражения объекта по эмпирическим формулам с экспериментально полученными результатами, можно отметить, что при одних и тех же углах, вероятность поражения защищаемого объекта, определенная экспериментального оказывается меньше для случая, когда используются жесткие провода и радиус модели тросового молниеотвода меньше радиуса провода. При этом кривая, отражающая экспериментальные результаты, на отдельных участках повторяет ход расчетной кривой. Особенно это характерно для случая, когда радиусы моделей проводов и тросов равны.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования процессов поражения моделей энергетических объектов разрядом из облака заряженного аэрозоля и их сопоставление с существующими расчетными методами определения молниезащищенности объектов позволяют сформулировать следующее.

1) Проведенные экспериментальные исследования поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля моделей протяженных объектов (проводов) и тросовых молниеотводов также показали, что есть оптимальный диапазон радиусов тросовых молниеотводов, при которых увеличивается эффективность их защитного действия. Этот оптимальный диапазон радиусов тросового молниеотвода, при котором обеспечиваются условия для старта с него встречного (восходящего) лидерного разряда, составляет от 0,6 до 1,0 см. Поэтому рекомендуется использовать в качестве тросового молниеприемника тросы (марки C70 или большего сечения) или сталеалюминиевые провода (марки ACK120 или AC50/50), которые параллельно еще будут решать проблему коррозионной стойкости тросов и стойкости к протеканиям токов короткого замыкания по тросам [16, 17].

2) Экспериментальные исследования процесса поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля моделей тросов и проводов показали возможность существенного изменения вероятности поражения модели фазного провода из-за несинфазного раскачивания моделей фазных проводов и молниезащитных тросов под действием электрического поля искусственного облака заряженного аэрозоля и разрядов из облака, когда модели были выполнены из гибких проводников. Причиной такого раскачивания было силовое взаимодействием зарядов облака и разрядов из него с зарядами, наводимыми на моделях проводов и тросов. Раскачка моделей проводов и тросов значительно увеличивала вероятность поражения модели фазного провода (амплитуда колебаний моделей проводов до ходила до 7 см, что соответствует 10 м в реальных пролетах ВЛ), в ряде случаев на несколько порядков.

Таким образом, раскачка проводов и грозозащитных тросов может изменить защитные углы тросовой грозозащиты, и фазные провода могут поражаться молнией гораздо чаще из-за противоположного отклонения троса и провода в пролете линии электропередачи. По оценкам [18-20] силы, действующие на провода и тросы со стороны электрических полей грозовых облаков и разрядов молнии из них, могут быть соизмеримы с весом провода и воздействием на провод ветровой нагрузки со скоростью более 20 м/с. Особенно этот эффект может проявиться при мощных продолжительных грозах, когда есть многоударные вспышки молнии, которые длятся несколько секунд, а само грозовое воздействие длится десятки минут. Поэтому рекомендуется при проведении расчетов вероятности поражения фазных проводов ЛЭП учитывать возможность изменения угла защиты троса за счет несинфазного раскачивания проводов и тросов, выбирать и обеспечивать такое соотношение между механическими характеристиками фазных проводов и грозозащитных тросов (натяжение, длина пролета, марка и сечение, стрела провеса, учет климатических факторов), при котором будет раскачивание проводов и тросов под воздействием внешних сил наиболее близкое к синфазному.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования и физическое моделирование процессов поражения молнией моделей пртяженных объектов для исследования эффективности их молниезащиты с использованием искусственных заряженных аэрозольных облаков. Экспериментально определены вероятности поражения и зоны защиты моделей молниеотводов. Исследовано влияние характеристик моделей молниеотводов и объектов на процесс их поражения разрядом из облака. Найдено существенное влияние соотношения размеров (радиусов проводов и тросов) на вероятность поражения модели объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля и размер зоны защиты молниеотвода.

Установлена общая тенденция: при превышении определенного угла защиты модели тросового молниеотвода (от 32 градусов для гибких моделей проводов и тросов до 50 градусов для жестких моделей проводов и тросов) наблюдается существенный рост вероятности поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля. Зона его защиты очень быстро уменьшается по объему, то есть он фактически перестает выполнять свое главное функциональное назначение – защиту провода от прямых ударов молнии (в данном случае от разрядов из искусственного облака заряженного водного аэрозоля). При углах защиты модели тросового молниеотвода менее 30° во всех случаях наблюдается снижение вероятности поражения модели протяженного и поражения модели протяженного объекта разрядом из облака заряженного аэрозоля до уровня менее 0,001.

Экспериментальные результаты показали, что вероятность поражения модели провода разрядом из облака заряженного аэрозоля существенно зависит от соотношения радиусов моделей поводов и тросовых молниеотводов и от варианта выполнения моделей проводов и тросов (гибкого или жесткого). Как и в случае моделей сосредоточенных объектов и стержневых молниеотводов найдены оптимальные размеры (радиус) модели тросового молниеотвода, при которых обеспечивается наибольшая эффективность защиты модели протяженного объекта (провода): от 0,7 см до 1,1 см. В то же время наблюдается существенное уменьшение эффективности защитного действия модели тросового молниеотвода для случая выполнения моделей из гибкого провода по сравнению со случаем их выполнения в жестком неподвижном варианте из-за несинфазного раскачивания моделей проводов и тросов под действием электрического поля облака заряженного аэрозоля и разрядов из него.

Выполнено сопоставление экспериментальных результатов с расчетными и экспериментальными методиками определения молниезащиты различных энергетических объектов, используя действующие нормативные документы по молниезащите.

Для модели тросового молниеотвода была установлена тенденция существенного роста вероятности поражения объекта после превышения углом защиты троса определенного значения, и наблюдается корреляция между экспериментальными и расчетными результатами только в области углов защиты, не превышающих этого критического угла.

Список литературы: 1. P. Laroche Recent progress and open questions on the physics of lightning // Proceedings of 13th International Conference on Atmospheric Electricity. - Beijing, China, 2007. 2. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений РД 34.21.122-87. - М: Энергоатомиздат, 1989. 3. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций: СО - 153 - 34.21.122-2003. - М.: МЭИ, 2004. 4. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. - С.-Пб.: ПЭИПК Минтопэнерro PD, 1999. 5. IEC Standard 62305-1. Protection against lightning – Part I: General principles. 2005. 6. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 7. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: Physics and Effects. - Cambridge University Press, 2003. 8. M.R. Bank Tavakoli, B. Vahidi Shielding failure rate calculation by means of downward and upward lightning leader movement models: Effect of environmental conditions // Journal of Electrostatics. - 68 (2010). -P. 275-283. 9. L. Arevalo, V. Cooray 'The mesh method' in lightning protection standards - Revisited // Journal of Electrostatics. - 68 (2010). - P. 311-314. 10. V. Rakov A Review of Triggered-Lightning Experiments // Proceedings of 30th International Conference on Lightning Protection. - Cagliari, Italy, 2010. 11. C. Bouquegneau A critical view on the lightning protection international standard // Journal of Electrostatics. - 65 (2007). - Р. 395-399. 12. Александров Г.Н. Физические основы моделирования разрядов молнии при лабораторных исследованиях молниезащиты // Труды Первой Российской конференции по молниезащиту. - Новосибирск, 2007. - С. 63-70. 13. Гайворонский А.С., Овсянников А.Г. Методы физического моделирования грозопоражаемости наземных объектов // Труды Первой Российской конференции по молниезащите. - Новосибирск, 2007. - С. 85-90. 14. А.Г. Темников, А.В. Орлов Экспериментальное исследование характеристик стебля стримерной короны с использованием искусственного облака заряженного водного аэрозоля // Электричество. – № 12. - 2005. - С. 14-21. 15. Темников А.Г., Орлов А.В., Соколова М.В., Синкевич О.А., Фирсов К.Н., Василяк Л.М. и др. Исследование электрических разрядов вблизи искусственного заряженного аэрозольного облака и их взаимодействие с лазерной искрой // Теплофизика высоких температур. - Т. 41, № 2. - 2003. - С. 200-210. 16. В.И. Кузнецов, В.Н. Осотов, А.И. Цыткин, Ю.А. Коржавин, Ю.А. Фоминых О старении и эксплуатационном ресурсе проводов и тросов воздушных линий электропередачи // Электрические станции. – № 4. – 1994. 17. А.И. Цыткин, О.Г. Шишкина, А.М. Коротаев О грозозащите ВЛ 110-500 кВ в Свердловэнерго // Электрические станции. - № 5. -1992. 18. Дьяков А.Ф., Макальский Л.М, Никитин О.А., Орлов А.В., Темников А.Г. Возможные причины поражения линий электропередач сверхвысокого напряжения разрядами молнии // Депонированная Рук. Информэлектро №25-ЭТ94, 1994. 19. Temnikov A.G., Makalsky L.M., Nikitin O.A., Orlov A.V. The possible mechanism of the lightning break toward the transmission line wires // Proceedings, 22nd Intern. Conf. on Lightning Protection. – Budapest, Hungary, 1994. – R6b-07. 20. Temnikov A.G., Makalsky L.M., Orlov A.V. Possible mechanism of lightning strokes to extra-high-voltage power transmission lines // J. of Electrostatics. - 37. - 1996. - P. 249-260.

Поступила в редколлегию 24.10.2011

С.Ю.ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»; *В.В.ВОЛОХИН*, канд. техн. наук, старший преподаватель, Сумской государственный университет; *А.А.ОКУНЬ*, аспирант, НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ УСТАНОВОК ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Розглядаються програмні засоби розрахунку електричних полів установок високої напруги. У статті приведені короткі відомості про найбільш поширені продукти і їх виробниках. Описані переваги і недоліки застосування таких програмних комплексів як Ansys, Femlab, Maxwell, Coulomb 3D та Elcut.

Softwares to calculate the electric fields of high voltage installations are considered. In this article the short information of the most widespread products and their producers is given. Advantages and disadvantages of application of such program complexes as *Ansys, Femlab, Maxwell, Coulomb 3D* and *Elcut* are described.

Рассматриваются программные средства расчета электрических полей установок высокого напряжения. В статье приведены краткие сведения о наиболее распространенных продуктах и их производителях. Описаны преимущества и недостатки применения таких программных комплексов как *Ansys, Femlab, Maxwell, Coulomb 3D* и *Elcut.*

Постановка проблемы. Численные методы требуют большого количества вычислений, поэтому для усовершенствования процесса расчета на базе данных методов создано большое число программных продуктов, предназначенных для решения полевых задач применительно к энергетике. В области программных средств расчета и анализа электрических полей установок высоких и сверхвысоких напряжений на сегодня сложилась противоречивая ситуация. Процесс обновления возможностей данного программного обеспечения в ведущих фирмах происходит весьма динамично. Однако, отсутствие подробной документации и недостаточная информированность о возможностях, приводят к трудностям в их изучении, применении при расчетах и, как следствие, – написании своих русскоязычных узко-ориентированных программ.

Метод решения. Многообразие программных комплексов, которые могут применяться для решения полевых задач установок высоких напряжений приведены в табл. 1. В этой таблице представлены краткие сведения о наиболее распространенных программах расчета электрических полей и их производителей. Правильный выбор программного средства – надежное условие эффективного использования. Основными критериями выбора яв-

ляются:

- распространенность;
- цена;
- широта охвата поставленных задач;
- удобство работы и простота создания геометрических моделей;
- наличие широкой библиотечной базы объектов;
- возможность и простота стыковки с другими программами.

Таблица 1 – Программные средства для анализа и расчета электрических полей установок высоких напряжений

Наименование пакета	Наименование фирмы- изготовителя	Краткая характеристика пакета			
High-Frequency Structure Simu- lator (HFSS)	Ansoft Corporation	В основе – метод конечных элементов			
ANSYS	ANSYS, Inc	В основе – метод конечных элементов, возможность решения связанных задач			
COULOMB 3D		Соответственно 3D и 2D-расчеты элек-			
ELECTRO 2D Integrated Engi- neering Software		тростатических и квазистатических электрических полей. Используются ме- тод граничных элементов и гибридные методы			
ELCUT	ПК «TOP»	В основе – метод конечных элементов			
FEMLAB Elec- tromagnetics Module	COMSOL	3D- полноволновое моделирование по- лей с решателем на базе MatLab. Ис- пользуется метод конечных элементов			
IE3D	Zaland Saftruara	Полноволновое трехмерное и плоское электромагнитное моделирование с ис- пользованием метода моментов и опти- мизация			
Fidelity		3D -полноволновое электромагнитное моделирование с использованием мето- да конечных разностей во временной области			
Maxwell	Ansoft Corporation				
MSC/EMAS	MacNeal - Schwendler Corpo- ration	В основе – метод конечных элементов			
XFDTD	Remcom, Inc	В основе – метод конечных разностей во временной области			

Практически все приведенные в табл. 1 программные комплексы имеют следующую структуру:

- 1) предварительная подготовка (выбор типа и свойств конечных элементов, определение системы единиц, задание констант);
- 2) создание геометрической модели;
- 3) задание свойств материалов;
- 4) постановка граничных условий;
- 5) задание источников;
- 6) выбор способа решения системы уравнений;
- 7) обработка результатов расчетов и их визуализация.

В современных программах, используемых для анализа и расчета электрических полей, можно выделить следующие основные черты:

- ориентированность на пользователя (удобный Windows-интерфейс);
- отсутствие подробной документации на русском языке;
- отсутствие широкой библиотечной базы стандартных элементов;
- наличие во всех пакетах четко выраженных стадий процесса моделирования: подготовка, решение и обработка.

Все пакеты являются универсальными (предназначены для решения различных типов полевых задач), позволяют решать линейные и нелинейные задачи, и обладают примерно одинаковой точностью и возможностями. Основные существенные отличия пакетов представлены в табл. 2.

№	Возможности пакета	ANSYS	Femlab	Maxwell	Elcut	Coulomb (Electro)
	Геометрическая модель:					
1	Двухмерная	да	да	да	да	да
1	Осесимметричная	да	да	да	да	да
	Трехмерная	да	да	да	нет	да
2	Выбор типа конечно-	ПО	нет	да	нет	да
	го элемента	Да				
3	Возможность импор- та/экспорта моделей	да	да	да	нет	да
	программ					
4	Возможность моде-					
	лирования внешних	да	да	да	нет	да
	электрических цепей					

Таблица 2 – Сравнение возможностей пакетов

Среди рассматриваемых программ Elcut на первый взгляд обладает ограниченными возможностями по сравнению с другими программами. Однако некоторые ограничения достаточно легко преодолеваются. Например, Elcut не позволяет моделировать трехмерные объекты, однако существует множество объектов являющихся с точки зрения геометрии телами вращения, а осесимметричные задачи с помощью Elcut решаются и дают те же результаты, что и в трехмерной постановке.

Преимуществом же Elcut безусловно является наличие русскоязычной версии, документации на русском языке, большое количество примеров, поставляемых с программой, а также развитые возможности по обработке результатов расчета.

Пакет ANSYS обладает наибольшим числом достоинств. Однако сложность интерфейса программы, большое число параметров ее настройки и почти полное отсутствие учебников по программе на русском языке затрудняют ее использование. Обычно применение этого пакета ассоциируется с расчетами механических конструкций, а не электрических полей, однако такая возможность предусмотрена.

Пакет Maxwell характеризуется выгодным на фоне аналогов сочетанием широты возможностей и простоты освоения. Подобен ANSYS, однако более прост в освоении и ориентирован на расчеты электромагнитных полей.

Пакет Femlab соединяет в себе достоинства двух других пакетов. Он обладает простым и понятным интерфейсом, как Elcut, и имеет практически те же расчетные возможности, что и ANSYS. Кроме этого Femlab, по-сути, является инструментом пакета Matlab и работает под его управлением. Это означает, что все возможности программирования, доступные в Matlab, могут быть использованы и в Femlab (например, при обработке результатов расчета). Еще одним огромным достоинством Femlab является возможность экспорта конечно-элементной модели в Simulink (инструмент моделирования динамических систем, встроенный в Matlab). Это позволяет моделировать не только простейшие внешние электрические цепи, но и работу установки совместно с системами управления.

Большинство производителей программного обеспечения использует метод конечных элементов (МКЭ). Исключением является компания Integrated Engineering Software со своим продуктом Coulomb 3D, продвигающая концепцию расчета полей посредством метода граничных элементов (МГЭ) и гибридных методов (на основе МКЭ и МГЭ). Таким образом, в зависимости от сложности решаемой задачи и требованиям по точности пользователь может выбрать нужный численный метод для проведения расчетов.

Необходимо отметить, что расчетная модель может быть создана во встроенной системе Coulomb 3D, так и альтернативно пакет может прочитывать модели других известных систем геометрического моделирования (Ideas, Solid Works, Pro Engineer, Solid Edge и другие).

Выводы

1. Практически все программные пакеты расчета электрических полей,

представленные в данной статье, обеспечивают возможность расчета потенциалов и напряженностей полей, впоследствии успешно подтверждаемых экспериментально.

2. С точки зрения функциональных возможностей и целесообразности применения для решения полевых задач актуальных для электроэнергетики наиболее универсальными являются Coulomb 3D и Maxwell. Применение их должно быть тщательно рассмотрено на основе конкретных примеров.

Список литературы: 1. Агапов С.В., Чермошенцев С.Ф. Методы и средства анализа и прогнозирования электромагнитных излучений от электронных средств // Информационные технологии. – 2003. – № 11. – С. 2-12. 2. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с. 3. Вишняков С.В., Гордюхина Н.М., Федорова Е.М. Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS. – М.: Издательство МЭИ, 2003. 4. В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем: Монография. – Самара: ООО «ИПК «Содружество», 2009. – 198 с. 5. Ansoft high frequency structure simulator v 10. – User's guide, 2005. 6. Ansoft Maxwell 3D Field Simulator v 11. – User's guide. 7. El-Fouly T.H.M., El-Saadany E.F., Salama M.M.A., Abdel-Galil T.K., Habiballah I.O. Power transmission lines generated electric and magnetic fields calculations / COMSOL multiphysics user's conference, Boston, USA, 2005. 8. Elcut. Моделирование двухмерных полей методом конечных элементов. Версия 4.2 Руководство пользователя. – СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2000. – 130 с. 9. http://www.integratedsoft.com/products/coulomb/default.aspx.

Поступила в редакцию 21.10.2011

ЗМІСТ

М.И.Баранов, В.М.Зиньковский, Ю.П.Зябко, Н.Н.Игнатенко, В.О.Лысенко Разработка и создание передвижного емкостного делителя импульсного напряжения амплитудой до 100 кВ	3
М.И.Баранов, Г.М.Колиушко Экспериментальная оценка электриче- ской прочности длинных воздушных промежутков в электродной систе- ме «стержень–стержень» для микросекундных импульсов напряжения .	11
А.Д.Блащенко, Н.П.Головина К работе импульсного электроразрядно- го источника энергии в режиме, близком к согласованному	21
Л.З.Богуславский, Н.С.Назарова, Л.Е.Овчинникова, Д.В.Винничен- ко; В.В.Диордийчук, С.С.Козырев Система мониторинга плазмохими- ческого синтеза наноуглерода при высокочастотной разрядноимпульс- ной обработке газообразного углеродсодержащего сырья	27
Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов, С.Ф. Коняга Использование электрических разрядов в плазмокаталитических технологиях	35
Р.К.Борисов О повышении надежности работы распределительных электрических сетей в грозовой сезон	39
М.В.Бутко, С.М.Бутко, О.Ю.Дубийчук, В.В.Рудаков, С.Н.Свиридок Электрические характеристики изоляции импульсных конденсаторов, включающих слои полипропиленовой пленки толщиной 40 мкм	47
А.Я.Дмитришин Определение оптимальной конструкции диэлектриче- ской системы секции высоковольтного импульсного конденсатора для погружного электроразрядного комплекса с помощью расчета электри- ческого поля	54
I.C.Дорохін, В. М. Поштаренко Порівняльний аналіз показників проду- ктивності VoIP додатків на основі імітаційного моделювання	58
В.М.Золотарев, В.П.Карпушенко, В.В.Золотарев, Ю.А.Антонец, А.А.Науменко Тангенс угла диэлектрических потерь многослойных сшитых изоляционных конструкций	64
О.С.Жученко, А.О.Соловйов, О.В.Суста Оцінка кількості інформаційних потоків в кільцевій мережі на основі комутаторів Ethernet з підтримкою протоколу STP	74
В.В.Князев, А.Э.Горюшкин, А.Ю.Скобликов Результаты численного моделирования распределения напряженности электрического поля по поверхности стержневого молниепремника	77

В.В.Князев, Ю.С.Немченко, И.П.Лесной, С.Б.Сомхиев Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («Кабель-	96
ная инжекция», форма 1,2) В.В.Князев, А.Ю.Скобликов Альтернативная методика испытаний устойчивости бортового оборудования летательных аппаратов к воздейст-	04
Д.Г.Колиушко, А.А.Петков Статистическая модель поражения одиночного стержня разрядом молнии	103
М.Ф.Логвиненко, О.В.Касілов, В.В.Шевцова Аналіз та оптимізація протоколу передачі даних з накопиченням та квазіадресним перепитом .	108
В.Я.Певнев, М.В.Цуранов Экспериментальное исследование моделей групповых ошибок в канале связи	115
С.И.Приходько, Н.А.Штомпель Оценка вычислительной сложности метода частотного алгебраического декодирования сверточных кодов .	122
П.Е.Пустовойтов Исследование информационных потоков данных в телекоммуникационных сетях	128
С.С.Руденко, А.А.Петков Определение теплофизических характеристик резисторов ТВО-10 и ТВО-60	133
О.А.Серков, С.О.Нікітін, Л.О.Нікітіна Метод підвищення ефективності використання радіочастотного діапазону для мереж IEEE 802.22 WRAN	139
О.Н.Сизоненко, Г.П.Богатырева, Н.А.Олейник, Г.Д.Ильницкая, А.Д.Зайченко, Е.В.Липян, А.С.Торпаков Влияние воздействия высоковольтным электрическим разрядом на изменение гранулометрического состава алмазных порошков	145
А.Г.Темников, Л.Л.Черненский, А.В.Орлов, Т.К.Герастенок, О.С.Белова Применение искусственных заряженных облаков для исследования молниезащиты сосредоточенных объектов на моделях	151
А.Г.Темников, Л.Л.Черненский, А.В.Орлов, Т.К.Герастенок, О.С.Белова Применение искусственных заряженных облаков для исследования молниезащиты энергетических объектов на моделях	170
С.Ю.Шевченко, В.В.Волохин, А.А.Окунь Анализ программных средств расчета электрических полей установок высоких напряжений .	190

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Тематичний випуск «Техніка та електрофізика високих напруг»

Випуск № 49'2011

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. № 164/11

Підп. до друку 18.11.2011 р. Формат 60х84 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. № 21/11. 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.