



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

**60'2013**

**Харків**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

# **ВІСНИК**

## **НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

*Серія: Техніка та електрофізика  
високих напруг*

**№ 60 (1033) 2013**

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків  
НТУ «ХПІ», 2013

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць.** Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 60 (1033). – 171 с.

**Державне видання**

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України**

**КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Збірник виходить українською та російською мовами.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).*

### **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, чл.-кор. НАН України;

Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, 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. Дмитрисенко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;

В. В. Спіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;

П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, 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.;

О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.;

П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.;

М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;

Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. Тимофіїв, д-р техн. наук, проф.;

М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

### **Редакційна колегія серії:**

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

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

М. І. Баранов, д-р техн. наук, ст. наук співр.; Н. І. Бойко, д-р техн. наук, доц.;

Р. К. Борисов, канд. техн. наук; А. Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.;

Б. В. Клименко, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Коліушко, канд. техн. наук, ст. наук співр.;

В. М. Михайлов, д-р техн. наук, проф.; В. В. Князев, канд. техн. наук, ст. наук співр.;

К. Ю. Сахаров, д-р техн. наук; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, проф.;

В. В. Рудаков, д-р техн. наук, проф.; І. В. Яковенко, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук співр.

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Техніка та електрофізика високих напруг», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 9 від 1 листопада 2013 р.

*М. И. БАРАНОВ*, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

## **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ ДЕБРОЙЛЕВСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛУВОЛН В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ С ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ**

Представлены расчетно-экспериментальные результаты продольного волнового распределения дрейфующих свободных электронов в круглом металлическом проводнике с импульсным аксиальным током большой плотности, указывающие на существование в его внутренней проводящей микроструктуре электронных полуволен де Бройля.

**Ключевые слова:** металлический проводник, дрейфующие свободные электроны, импульсный ток, волновое распределение электронов, электронные полуволены.

### **Введение**

В ряде ранее опубликованных работ [1–4] автором было показано, что распространение электрического постоянного, переменного или импульсного тока проводимости различной плотности по круглому металлическому проводнику сопровождается специфическим волновым процессом, обусловленным известными дуалистическими свойствами (одновременно корпускулярными и квантованными волновыми свойствами, характерными для элементарных частиц [5,6]) дрейфующих в его внутренней кристаллической микроструктуре свободных электронов. Расчетным путем было установлено, что для этого волнового процесса является характерным наличие в данном проводнике одновременно стоячих продольных и радиальных электронных полуволен де Бройля [3,7]. При этом суперпозиция квантованных волновых пси-функций, определяющих пространственно-временную эволюцию свободных электронов в проводящей структуре проводника, приводит к формированию в этой структуре волновых электронных пакетов (ВЭП) [4], характеризующихся наличием на их ширине глобальных максимумов соответствующих мод указанных пси-функций. Так как квадрат модуля продольных  $\psi_{nz}(z,t)$  и радиальных  $\psi_n(r,t)$  квантованных волновых пси-функций для круглого цилиндрического проводника с аксиальным током определяет плотность вероятности нахождения свободного электрона в том или ином месте проводника, то в зонах глобальных максимумов данных волновых пси-функций (в зонах формируемых ими ВЭП) будет происходить концентрация дрейфующих электронов. Повышенная объемная плотность свободных электронов на продольных и радиальных участках ВЭП приводит к повышенной объемной плотности тепловых потерь и соответственно температуры на этих участках. В результате такого волнового распределения свободных электронов в ука-

© М. И. Баранов, 2013

занном проводнике будут формироваться неоднородные периодические продольные и радиальные температурные поля, содержащие относительно «горячие» и относительно «холодные» участки. Опытная фиксация таких тепловых полей и соответственно ВЭП со своими стоячими электронными полу волнами де Бройля в реальных немассивных (тонких наружным радиусом  $r_0 \leq 1$  мм) проводниках возможна только при достаточно больших плотностях аксиального тока в их материале (порядка  $10^9$  А/м<sup>2</sup> [3]), при которых линейные размеры образующихся в зонах ВЭП относительно «горячих» продольных участков могут составлять несколько миллиметров [8]. Что касается экспериментального обнаружения неоднородного радиального температурного поля в тонком металлическом проводнике, когда линейные размеры образующихся в зонах ВЭП относительно «горячих» радиальных участков могут составлять единицы микрометров, то оно возможно только при детальном высокоскоростном исследовании высокоразреженных продуктов «металлической» плазмы, образующейся при его электрическом взрыве (ЭВ) в газовой или конденсированной (жидкой) среде [9]. С учетом реально имеющегося на сегодня в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» экспериментального научно-исследовательского оборудования автору представляется возможным с помощью генератора длительной *C*-компоненты импульсного тока искусственной молнии (генератора ГИТ-5С на номинальное напряжение его конденсаторной батареи  $\pm 5$  кВ и апериодический импульс тока амплитудой до 1 кА при его полной длительности до 1000 мс [10]) осуществить в условиях высоковольтной лаборатории опытным путем подтверждение существования электронных полу волн де Бройля в тонком оцинкованном стальном проводе, испытывающем воздействие на его проводящую структуру импульсного аксиального тока  $i_0(t)$  большой плотности  $\delta_0(t)$ . На мой взгляд, в мире подобной прикладной электрофизической задачей, наглядно раскрывающей в области высоко точной электротехники фундаментальные основы теории электричества применительно к металлическим проводникам с током проводимости, никто пока не занимался.

**1 Расчетная оценка продольного волнового распределения дебройлевских электронных полу волн в металлическом проводнике с импульсным током проводимости большой плотности.** Для этой цели выбираем тонкий поперечным сечением  $S_0 = \pi r_0^2$  и длиной  $l_0$  круглый прямолинейный металлический провод (рис. 1), по которому в продольном направлении с усредненной плотностью  $\delta_0(t)$  протекает импульсный ток  $i_0(t)$  произвольных амплитудно-временных параметров (АВП). Согласно [1,3] в этом проводе дрейфующие свободные электроны распределяются вдоль его продольной оси *OZ* так, что на его длине  $l_0$  будет всегда уместиться целое квантовое число  $n$  электронных полу волн де Бройля, удовлетворяющих такому соотношению:

$$\lambda_{enz}/2 = l_0/n, \quad (1)$$

где  $\lambda_{enz} = h / (m_e v_{enz})$  – квантованная длина волны свободного электрона, равная длине стоячей волны де Бройля для данной элементарной частицы [5];  $v_{enz} = nh / (2m_e l_0)$  – квантованная скорость дрейфующего вдоль микроструктуры провода свободного электрона;  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка [6];  $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона [5];  $n = 1, 2, 3, \dots, n_m$  – целое квантовое число;  $n_m$  – максимальное значение квантового числа  $n$ .

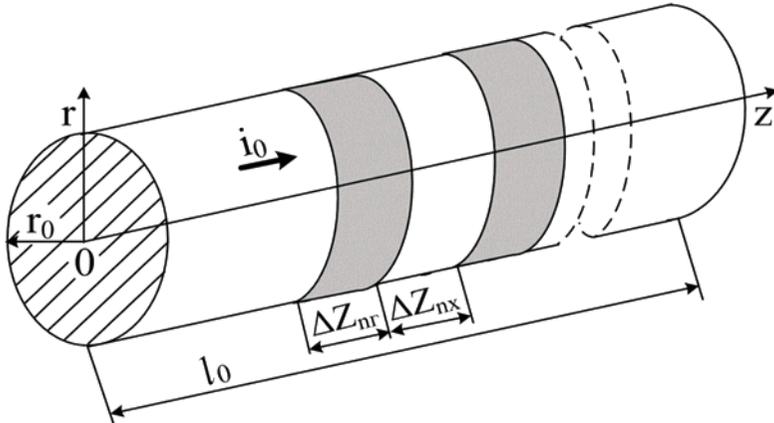


Рисунок 1 – Схематическое изображение круглого металлического проводника наружным радиусом  $r_0$  и длиной  $l_0$  с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$ , относительно «горячими» шириной  $\Delta z_{nz}$  и «холодными» шириной  $\Delta z_{nx}$  продольными участками

Причем, с учетом (1) для шага продольной периодической тепловой структуры и соответственно шага продольной структуры размещения отдельных ВЭП в рассматриваемом нами проводе будет выполняться соотношение:

$$\lambda_{enz}/2 = \Delta z_{nz} + \Delta z_{nx} = l_0/n, \tag{2}$$

где  $\Delta z_{nz}$ ,  $\Delta z_{nx}$  – соответственно квантованная ширина «горячего» и «холодного» продольных участков провода с импульсным током различных АВП.

Кроме того, из (2) для одной четвертой части длины стоячей квантованной волны де Бройля  $\lambda_{enz}/4$ , соответствующей центрам первых от концов провода ВЭП и соответственно серединам ширин первых от краев провода «горячих» участков, и квантованной продольной координаты первых от краев глобальных максимумов квантованных волновых функций  $\psi_{nz}(z,t)$  следует:

$$z_{nm} = \lambda_{enz}/4 = l_0/(2n). \tag{3}$$

Из (1)–(3) видно, что для обоснованного подтверждения волнового характера распределения вдоль исследуемого металлического провода дрейфующих в его проводящем материале свободных электронов необходимы расчетные соотношения для нахождения ширин «горячих»  $\Delta z_{nz}$  и «холодных»  $\Delta z_{nx}$  продольных участков. В соответствии с данными из [3,8,12] для кванто-

ванных ширин «горячих»  $\Delta z_{nz}$  и «холодных»  $\Delta z_{nx}$  продольных участков рассматриваемого провода с импульсным аксиальным током большой плотности  $\delta_0(t)$  с учетом (2) можно записать следующие приближенные выражения:

$$\Delta z_{nz} = e_0 n_{e0} h (m_e \delta_{0m})^{-1} [8 + (\pi - 2)^2]^{-1}; \quad (4)$$

$$\Delta z_{nx} = l_0 / n - e_0 n_{e0} h (m_e \delta_{0m})^{-1} [8 + (\pi - 2)^2]^{-1}, \quad (5)$$

где  $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – элементарный электрический заряд электрона [5];  $n_{e0}$  – усредненная объемная плотность (концентрация) свободных электронов в проводящем материале провода до протекания по нему тока;  $\delta_{0m}$  – амплитуда плотности  $\delta_0(t)$  импульсного аксиального тока  $i_0(t)$  в проводе.

Известно, что величина  $n_{e0}$ , входящая в расчетные соотношения (4) и (5), равна концентрации атомов  $N_0$  проводящего материала провода, умноженной на его валентность, определяемую числом неспаренных электронов на внешних электронных слоях (энергетических уровнях) атомов материала нашего провода (например, для цинка, железа и меди валентность равна двум [6]). Что касается величины  $N_0$ , то она для металла провода с массовой плотностью  $d_0$  определяется из известного в атомной физике соотношения [5]:

$$N_0 = d_0 (M_a \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27})^{-1}, \quad (6)$$

где  $M_a$  – атомная масса проводящего материала провода (например, для меди данная величина в атомных единицах массы согласно периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева равна  $M_a = 63,55$  [6]), практически равная массовому числу ядра атома металла провода (следует напомнить любопытному читателю, что одна атомная единица массы равна 1/12 массы атома изотопа углерода  $^{12}_6C$ , численно составляющей  $1,6606 \cdot 10^{-27}$  кг [6]).

Из (4) явствует, что ширина  $\Delta z_{nz}$  «горячего» продольного участка исследуемого провода в принятом автором приближении не квантуется и практически определяется величиной амплитуды плотности  $\delta_{0m}$  импульсного тока в нем. Чем больше значение  $\delta_{0m}$ , тем будет меньше величина  $\Delta z_{nx}$  и соответственно тем самым можно при ЭВ металлического провода ( $\delta_{0m} \gg 10^9$  А/м<sup>2</sup> [9,13]) получать меньшие линейные размеры продольных мелкодисперсных страт разрушающегося провода. В тоже время из (5) следует, что ширина  $\Delta z_{nx}$  «холодного» продольного участка выбранного нами провода явно квантуется и при неизменной величине плотности  $\delta_{0m}$  импульсного тока в проводе практически определяется численным значением квантового числа  $n$ . Для металла провода величина квантового числа  $n$  носит стохастический (вероятностный) характер, определяемый энергетическим состоянием свободных электронов, оказавшихся в микроструктуре материала провода в момент подачи на него электрического напряжения и начала протекания в нем электрического тока проводимости (продольного дрейфа этих электронов) того или иного вида (постоянного, переменного или импульсного) и соответственно направления движения (одно- или двухстороннего) в его проводящем материале указанных носителей электричества. Отметим, что в [14] автором была предложена

приближенная формула для расчетной оценки максимального значения квантового числа  $n$  – величины  $n_m$  для любого проводников материала, численно составляющей согласно данной формуле для широко используемых в области высоковольтной сильноточной импульсной техники медного, цинкового и стального (железного) проводников 32 (заметим, что минимальное значение рассматриваемого целочисленного квантового числа  $n$  согласно [1] равно 1).

Поэтому экспериментально обнаружив в тонком металлическом проводе с импульсным током большой плотности (малые значения плотности тока  $\delta_{0m} \ll 0,1$  кА/мм<sup>2</sup> в исследуемом проводе нам не подходят по тем причинам, что при таких значениях  $\delta_{0m}$  нагрев участков его проводящего тела оказывается визуально незаметным, а линейные размеры  $\Delta z_{nz}$  только «горячих» участков провода по (4) для большинства металлов оказываются равными порядка 500 мм, что создает большие технические трудности для их идентификации в лабораторных условиях) «горячие» шириной  $\Delta z_{nz}$  и «холодные» шириной  $\Delta z_{nz}$  продольные участки и сверив их опытные линейные размеры и места их размещения вдоль металлического провода с приведенными выше расчетными данными по аналитическим выражениям (1)–(5), можно обоснованно делать физико-техническое заключение о не- или присутствии в проводящей структуре такого провода квантованных дебройлевских электронных полуволн.

**2 Результаты экспериментальной оценки продольного волнового распределения дебройлевских электронных полуволн в металлическом проводнике с импульсным током проводимости большой плотности.** Используем в опытах жестко закрепленный в разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-5С [10] оцинкованный (с толщиной этого защитного покрытия  $\Delta_0 = 5$  мкм) стальной провод [15], имеющий следующие геометрические параметры (рис. 2):  $r_0 = 0,8$  мм;  $l_0 = 320$  мм;  $S_0 = 2,01$  мм<sup>2</sup>. При разряде заряженной конденсаторной батареи (для ее зарядного постоянного напряжения  $U_{3r} = -3,7$  кВ и запасаемой в ней электрической энергии  $W_r = 310$  кДж) высоковольтного генератора ГИТ-5С протекающий через исследуемый и частично электротермически разрушаемый провод (с потерей частью тела провода своей металлической проводимости) аperiodический импульс тока характеризовался следующими АВП: амплитудой  $I_{0m} = -745$  А; временной формой  $t_m/\tau_p = 9$  мс/576 мс ( $t_m$  – время, соответствующее токовой амплитуде  $I_{0m}$ ;  $\tau_p$  – полная длительность импульса тока); усредненной плотностью тока  $|\delta_{0m}| = 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>. На рис. 3 приведены результаты воздействия указанного импульса аксиального тока на используемый в опытах металлический провод.

Из данных рис. 3 отчетливо видно, что на длине  $l_0 = 320$  мм интенсивно нагреваемого указанным импульсом тока ( $|\delta_{0m}| = 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>) оцинкованного стального провода (для его основания  $n_{e0} = 2N_0 = 16,86 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup> [5]) в наблюдаемом случае имеется один «горячий» (одна ярко светящаяся вспученная

сферообразная зона ВЭП посередине провода, указывающая на то, что в этом случае  $n = 1$  шириной  $\Delta z_{nz} = 7$  мм (при его расчетной ширине по (4) в 5,7 мм) и два «холодных» (цилиндрические перешейки по обоим краям провода, один из которых подвергся частичной сублимации) шириной  $\Delta z_{nx} = 156,5$  мм (при их расчетной ширине по (3) и (5) в 157,1 мм) продольных участка. Для определенности и лучшего понимания расчетных и опытных результатов для рассматриваемой задачи следует заметить, что в ней (этой задаче) число размещенных вдоль провода ВЭП («горячих» участков) соответствует численному значению квантового числа  $n$ . Выполненные на оптическом микроскопе типа МБС-9 металлографические исследования остывшей посередине провода сферообразной зоны показали, что она содержит затвердевшие фракции вскипевшего (вспученного) цинкового покрытия (при температуре кипения для цинка в 907 °С [5]) и расплавленного стального основания провода (при температуре его плавления примерно в 1536 °С [5]). Эти опытные результаты свидетельствуют о том, что при джоулевом нагреве выбранного провода используемым нами импульсом аксиального тока в его внутренней кристаллической структуре достигаются температуры высокого уровня. На основании полученных в этом случае ( $n = 1$ ) опытных данных и выполненных для него (этого случая) расчетных квантовофизических оценок можно однозначно заключить, что в рассматриваемом случае в кристаллической микроструктуре оцинкованного стального провода происходит суперпозиция квантованных продольных волновых функций  $\psi_{nz}(z,t)$ , моды которых характеризуются одним квантовым числом  $n = 1$ . В результате существования в проводе таких мод пси-функций на его длине уместается лишь одна электронная полуволна де Бройля, для которой выполняется равенство  $\lambda_{enz}/2 = 320$  мм и в зоне ее амплитуды (посередине провода при  $z_{nm} = 160$  мм) формируется только один ВЭП с шириной «горячего» продольного участка, равной около  $\Delta z_{nz} = 7$  мм.



Рисунок 2 – Внешний вид исходного круглого оцинкованного стального провода ( $r_0 = 0,8$  мм;  $l_0 = 320$  мм;  $\Delta_0 = 5$  мкм;  $S_0 = 2,01$  мм<sup>2</sup>), размещенного в воздухе над теплозащитным асбестовым полотном, до протекания по нему в разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-5С аперiodического импульса тока большой плотности [11]

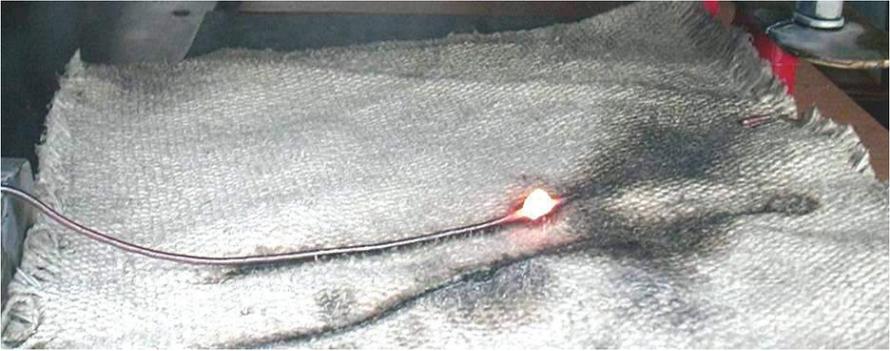


Рисунок 3 – Внешний вид остывающих на воздухе и теплозащитном асбестовом полотне одного «горячего» (высокотемпературной зоны ВЭП шириной  $\Delta z_{nz} = 7$  мм посередине провода) и двух «холодных» (шириной  $\Delta z_{nx} = 156,5$  мм при частичной сублимации одного из них) продольных участков оцинкованного стального провода ( $r_0 = 0,8$  мм;  $l_0 = 320$  мм;  $\Delta_0 = 5$  мкм;  $S_0 = 2,01$  мм<sup>2</sup>) после протекания по нему аperiodического импульса тока  $i_0(t)$  временной формы 9 мс/576 мс большой плотности ( $I_{0m} = -745$  А;  $|\delta_{0m}| = 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>;  $n = 1$ ) [11]

На рис. 4 представлены результаты протекания по исследуемому оцинкованному стальному проводу ( $r_0 = 0,8$  мм;  $l_0 = 320$  мм;  $\Delta_0 = 5$  мкм;  $S_0 = 2,01$  мм<sup>2</sup>) формируемого в разрядной цепи генератора ГИТ-5С того же униполярного импульса тока отрицательной полярности временной формы  $t_m / \tau_p = 9$  мс/576 мс ( $I_{0m} = -745$  А;  $|\delta_{0m}| = 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>). Видно, что в этом случае вдоль провода (для его покрытия  $n_{e0} = 2N_0 = 13,08 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup> [5]) размещаются уже три ВЭП ( $n = 3$ ) и соответственно три «горячих» продольных сферообразных участка также шириной, равной  $\Delta z_{nz} = 7$  мм. Такое опытное значение величины  $\Delta z_{nz}$  указывает на работоспособность для нее расчетного квантовомеханического соотношения (4). Число «холодных» продольных участков в проводе при этом составляет уже четыре ( $n + 1$ ), левый крайний из которых подвергся полной сублимации. Причем, оба крайних «холодных» участка на рис. 4, прилегающих к болтовым соединениям жесткого закрепления стального провода в разрядной цепи генератора ГИТ-5С, имеют опытную длину, равную около  $\Delta z_{nx} = 50$  мм (при их расчетной длине по (3) и (5) в 50,5 мм). Два внутренних «холодных» участка, размещенных между соседними «горячими» продольными участками, характеризуются опытной длиной около  $\Delta z_{nx} = 100$  мм (при их расчетной длине по (3) и (5) в 101 мм). Выявленное в ходе проведенных нами в условиях высоковольтной лаборатории на мощном сильноточном электрофизическом оборудовании высокотемпературных экспериментов отличие опытных длин двух крайних и двух внутренних «холодных» продольных участков оцинкованного стального провода ровно в два раза, а также наличие нечетного количества «горячих» участков вдоль этого провода (см. рис. 3 и 4) может свидетельствовать о наличии в его металличе-

ской микроструктуре не электронных волн де Бройля, а именно дебройлевских электронных полуволин.



Рисунок 4 – Опытное распределение вдоль круглого оцинкованного стального провода ( $r_0 = 0,8$  мм;  $l_0 = 320$  мм;  $\Delta_0 = 5$  мкм;  $S_0 = 2,01$  мм<sup>2</sup>) остывающих на воздухе и теплозащитном асбестовом полотне макроскопических трех «горячих» (высокотемпературных зон ВЭП провода шириной  $\Delta z_{nc} = 7$  мм) и четырех «холодных» (двух крайних шириной  $\Delta z_{nx} = 50$  мм при полной сублимации одного из них и двух внутренних шириной  $\Delta z_{nx} = 100$  мм) продольных участков после протекания по нему аperiодического импульса аксиального тока  $i_0(t)$  временной формы 9 мс/576 мс большой плотности ( $I_{0m} = -745$  А;  $|\delta_{0m}| = 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>;  $n = 3$ ) [11]

## Выводы

1. Приведены основные квантовофизические интегральные соотношения, приближенно описывающие продольное волновое распределение дрейфующих свободных электронов в кристаллической однородной (гомогенной) микроструктуре круглых металлических проводников с импульсным аксиальным током проводимости большой ( $\delta_{0m} \gg 0,1$  кА/мм<sup>2</sup>) или небольшой ( $\delta_{0m} \ll 0,1$  кА/мм<sup>2</sup>) плотности. Показано, что именно данное волновое распределение указанных носителей электричества и приводит к формированию в проводящей структуре металлических проводников с электрическим током различного вида (постоянного, переменного и импульсного) ВЭП – волновых электронных пакетов макроскопических размеров и соответственно к возникновению в ней (в этой металлической макроструктуре) относительно «горячих» и относительно «холодных» продольных участков, вызывающих формирование вдоль них (данных проводников) периодического неоднородного температурного поля с существенно различающимися уровнями температуры импульсного джоулева нагрева на указанных «горячих» и «холодных» продольных участках подобных проводников с током проводимости различных АВП.

2. Выполненные в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» на мощном высоковольтном генераторе импульсных токов [10] эксперименты, связанные с воздействием на проводящую макроструктуру тонкого оцинкованного стального

провода ( $r_0 = 0,8$  мм;  $l_0 = 320$  мм;  $\Delta_0 = 5$  мкм;  $S_0 = 2,01$  мм<sup>2</sup>) аperiодического импульса аксиального тока временной формы 9 мс/576 мс большой усредненной плотности тока ( $|\delta_{0m}| = 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>), с учетом представленных автором результатов приближенного квантовомеханического расчета в нем (данном проводе) продольного волнового распределения дрейфующих свободных электронов позволили однозначно установить интересный и важный для фундаментальных основ теории электричества и ее прикладных приложений в области сильноточной электроники, электротехники, промышленной электроэнергетики, техники и электрофизики высоких напряжений и больших импульсных токов электрофизический факт, заключающийся в том, что в металлических проводниках с электрическим аксиальным током различных АВП распространяются квантованные продольные электронные полуволны де Бройля, заполняющие всю их внутреннюю кристаллическую микроструктуру.

**Список литературы:** 1. Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // Электротехника. – М.: 2005. – № 7. – С. 25–33. 2. Баранов М.И. Энергетический и частотный спектры свободных электронов проводника с электрическим током проводимости // Электротехника. – М.: 2006. – № 7. – С. 29–34. 3. Баранов М.И. Новые физические подходы и механизмы при изучении процессов формирования и распределения электрического тока проводимости в проводнике // Технічна електродинаміка. – К.: 2007. – № 1. – С. 13–19. 4. Баранов М.И. Волновой электронный пакет проводника с электрическим током проводимости // Электротехніка і електромеханіка. – Х.: 2006. – № 3. – С. 49–53. 5. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с. 6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с. 7. Баранов М.И. Волновое радиальное распределение свободных электронов в цилиндрическом проводнике с переменным электрическим током // Технічна електродинаміка. – К.: 2009. – № 1. – С. 6–11. 8. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с. 9. Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии / Под ред. В.Н. Карнюшина. – Минск: Наука и техника, 1983. – 151 с. 10. Баранов М.И., Колушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента (Москва). – 2008. – № 3. – С. 81–85. 11. Баранов М.И. Исследование стохастического распределения электронных полуволн де Бройля и волновых пакетов в проводнике с импульсным током проводимости большой плотности // Электротехніка і електромеханіка. – Х.: 2008. – № 5. – С. 44–49. 12. Баранов М.И. Основные характеристики вероятностного распределения свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // Технічна електродинаміка. – К.: 2008. – № 1. – С. 8–12. 13. Баранов М.И., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. Экспериментально-аналитическое определение удельной энергии электротеплового разрушения медных проводников под воздействием больших импульсных токов // Электротехніка і електромеханіка. – Х.: 2004. – № 2. – С. 70–73. 14. Баранов М.И. Эвристическое определение максимального числа электронных полуволн де Бройля в металлическом проводнике с электрическим током проводимости // Электротехніка і електромеханіка. – Х.: 2007. – № 6. – С. 59–62. 15. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева; Под ред. Н.И. Белоруссова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.

Поступила в редколлегию 17.09.2013

УДК 621.3.022:537.311.8:621.7.044.7

**Расчетно-экспериментальное обоснование существования дебройлевских электронных полуволн в металлическом проводнике с импульсным током большой плотности /**

Представлені розрахунково-експериментальні результати подовжнього хвильового розподілу вільних електронів, що дрейфують, в круглому металевому провіднику з імпульсним аксіальним струмом великої щільності, які вказують на існування в його внутрішній провідній мікроструктурі електронних півхвиль де Бройля.

**Ключові слова:** металевий провідник, дрейфуючі вільні електрони, імпульсний струм, хвильовий розподіл електронів, електронні півхвилі.

The calculation-experimental results of the longitudinal wave distributing of drifting lone electrons are presented in a round metallic explorer with the impulsive axial-flow current of high-slay, indicative on existence in his internal conducting microstructure of electronic semiwaves de Broylea.

**Key words:** metallic explorer, drifting lone electrons, impulsive current, wave distributing of electrons, electronic semiwaves.

УДК 621.3.022:537.311.8:621.7.044.7

**М. И. БАРАНОВ**, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
**С. В. РУДАКОВ**, канд. техн. наук, доцент, УНГЗУ

## **УСРЕДНЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДРЕЙФУЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ С ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ ПРОВОДИМОСТИ БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ**

Представлены некоторые результаты теоретического и экспериментального исследования основных геометрических характеристик волнового продольного и радиального распределения дрейфующих свободных электронов в однородном цилиндрическом металлическом проводнике с импульсным аксиальным током большой плотности.

**Ключевые слова:** проводник, свободные электроны, импульсный ток, электронные волны, характеристики продольного и радиального распределения электронов.

**Введение.** Известно, что протекание электрического тока проводимости различных видов (постоянного, переменного и импульсного) и плотностей по металлическим проводникам сопровождается распространением в их внутренней кристаллической структуре квантованных стоячих электронных полуволн де Бройля [1–4]. Суперпозиция данных дебройлевских электронных полуволн приводит к возникновению в металле проводников с током указанных видов волновых электронных пакетов (ВЭП), образующих вдоль проводящего материала проводника макроскопическую периодическую структуру

© М. И. Баранов, 2013

[5]. Данная структура формирует в проводнике относительно «горячие» и относительно «холодные» продольные участки, температура материала которых может существенно отличаться (примерно в три раза) друг от друга [6]. В результате указанного выше волнового продольного распределения дрейфующих свободных электронов в металлическом проводнике с аксиальным электрическим током проводимости различных амплитудно-временных параметров (АВП) в нем возникает неоднородное периодическое продольное температурное поле [7]. В [8] автором было показано, что в рассматриваемых проводниках одновременно с неоднородным волновым продольным распределением дрейфующих свободных электронов наблюдается и неоднородное волновое радиальное распределение данных электронов. На взгляд автора, в настоящее время в теории электричества вопросам волнового распределения свободных электронов в различных проводящих структурах с электрическим током проводимости указанных видов уделено недостаточное внимание. Вот поэтому до сих пор ряд экспериментально зафиксированных электрофизических эффектов при получении низко- и высокотемпературной плазмы для современных физических исследований (например, образование при электрическом взрыве тонких металлических проводников продольных и радиальных страт, имеющих разную светимость и температуру [9,10]) остаются теоретически слабоизученными. В этой связи вопросы микроскопического формирования, макроскопического продольного и радиального распределения в металлических проводниках разных поперечных сечений  $S_0$  и длин  $l_0$  электрического тока проводимости с различными АВП требуют своего дальнейшего исследования.

**1 Определение основных усредненных характеристик для волнового продольного распределения дебройлевских полуволи в металлическом проводнике с импульсным аксиальным током различных АВП.** В связи с квантованным характером волнового продольного распределения дрейфующих под действием приложенного электрического напряжения свободных электронов в металлических проводниках с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$  (рис. 1) несомненную практическую значимость приобретают усредненные характеристики, описывающие подобное распределение. Так, из приведенного в [1,3] аналитического решения одномерного (в направлении продольной координаты  $z$ ) временного волнового уравнения Шредингера для цилиндрического металлического проводника с электрическим аксиальным током различных АВП следует, что в его кристаллической структуре возникает квантованный целочисленный набор  $\psi_{nz}(z,t)$  – функций, квантовое продольное волновое число  $k_{nz} = \pi n / l_0$  для которых при фиксированном значении времени  $t$  может принимать широкий спектр численных значений. Этот спектр значений  $k_{nz}$  для исследуемого проводника будет определяться изменением целого квантового числа  $n = 1, 2, 3, \dots, n_m$ , где  $n_m$  – максимальное значение квантового числа  $n$ . Автором в [4] было предложено квантованную

величину  $n_m$  в первом приближении для любого электропроводящего материала исследуемого проводника с током определять из следующей формулы:

$$n_m = 2 n_k^2, \quad (1)$$

где  $n_k$  – классическое главное квантовое число, равное числу электронных оболочек в изолированном атоме металла проводника и соответственно номеру периода в периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева, которому этот металл рассматриваемого проводника принадлежит [11].

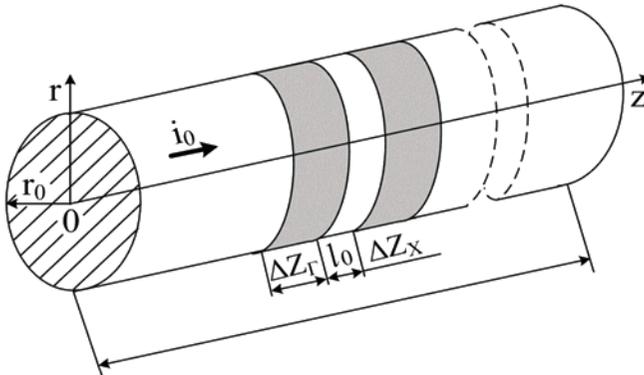


Рисунок 1 – Схематическое изображение исследуемого круглого цилиндрического металлического проводника радиусом  $r_0$  и длиной  $l_0$  с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$ , содержащего относительно «горячие» шириной  $\Delta z_\gamma$  и относительно «холодные» шириной  $\Delta z_x$  продольные участки

Согласно (1) для медного, цинкового и железного (стального) проводников, для которых согласно периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева главное квантовое число равно  $n_k = 4$  [12], возможное максимальное значение квантового числа  $n$  для дискретных мод волновых пси-функций  $\psi_{nz}(z,t)$ , суперпозиция которых формирует в микроскопической структуре электропроводящего материала исследуемого проводника макроскопическую вдоль длины  $l_0$  структуру ВЭП [1–5], может численно составлять  $n_m = 32$ . Следует отметить, что в соответствии с данными работ [1–7] каждой моде  $\psi_{nz}(z,t)$  – функций соответствуют свои ВЭП, центры которых располагаются в зоне амплитуд этих квантомеханических мод, образованных плоскими электронными волнами де Бройля. При одинаковом квантованном энергетическом состоянии дрейфующих свободных электронов (например, при  $n = 3$ ) им в указанном случае на длине  $l_0$  проводника будут всегда соответствовать три полуволны де Бройля длиной  $\lambda_{enz}/2$  и соответственно три ВЭП в области их (этих полуволн) амплитуд. При этом каждая длина  $\lambda_{enz}/2$  дебройлевской электронной полуволны в металле проводника с током проводимости различных АВП будет выбираться из следующего соотношения

[1,3]:

$$\lambda_{enz}/2 = l_0/n. \quad (2)$$

Из (2) следует, что чем больше значение квантового числа  $n$ , тем будет меньше величина  $\lambda_{enz}/2$  и соответственно тем будет больше число ВЭП, периодически размещенных вдоль рассматриваемого нами проводника. При этом каждый ВЭП будет соответствовать так называемому относительно «горячему» продольному участку проводника. Между такими «горячими» продольными участками шириной  $\Delta z_z$  на каждой длине  $\lambda_{enz}/2$  электронной полу волны де Бройля будут располагаться так называемые относительно «холодные» продольные участки шириной  $\Delta z_x$ . Причем, величина  $(\Delta z_z + \Delta z_x)$  будет характеризовать так называемый продольный шаг макроскопической периодической структуры ВЭП в металлическом проводнике. А существует ли усредненная характеристика  $\bar{n}$  для целого квантового числа  $n$ , которая будет определять усредненную макроскопическую продольную периодическую структуру ВЭП нашего металлического проводника с импульсным аксиальным током? Да, существует и она (величина  $\bar{n}$ ) с учетом (2) и усредненной длины дебройлевской продольной электронной полу волны вида  $\lambda_{enz}^*/2$  может быть найдена на основе следующего аналитического выражения [7,13]:

$$\lambda_{enz}^*/2 = l_0 (n_m - 1)^{-1} \int_1^{n_m} n^{-1} dn = l_0 (n_m - 1)^{-1} \ln n_m. \quad (3)$$

Соотношения (2) и (3) позволяют нам определить усредненную характеристику  $\bar{n}$  для целого квантового числа  $n$  в следующем приближенном виде:

$$\bar{n} = (n_m - 1) / (\ln n_m). \quad (4)$$

Из (4) видно, что для медного, цинкового и железного (стального) проводников с током, для которых  $n_k = 4$  и с учетом (1)  $n_m = 32$ , усредненное значение  $\bar{n}$  для квантового числа  $n$  окажется примерно равным 9. В разделе 3 будет приведено экспериментальное обоснование такому численному значению величины  $\bar{n}$  применительно к указанным материалам проводников.

Далее с учетом найденного согласно (4) усредненного значения для целого квантового числа  $n$  остановимся на приближенном определении усредненных значений ширин «горячих»  $\Delta z_z^*$  и «холодных»  $\Delta z_x^*$  продольных участков исследуемого проводника с импульсным аксиальным током различных АВП. С этой целью воспользуемся фундаментальным принципом квантовой электродинамики (механики) – соотношением неопределенностей Гейзенберга [12]. Для локализующихся на «горячих» продольных участках проводника дрейфующих свободных электронов данное соотношение принимает вид [12]:

$$\Delta z_z \cdot \Delta p_{zn} \geq h / (4\pi), \quad (5)$$

где  $\Delta p_{zn} = m_e v_{enz} = nh / (2l_0)$  – величина квантованной продольной проекции импульса дрейфующих в кристаллической микроструктуре проводника сво-

бодных электронов;  $v_{enz} = nh/(2me l_0)$  – квантованная скорость дрейфующих вдоль микроструктуры проводника свободных электронов [3];  $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона [11];  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка [11].

Тогда из (5) при  $n = \bar{n}$  с учетом (4) для наименьшего квантованного значения усредненной ширины  $\Delta z_z^*$  «горячего» продольного участка металлического проводника с импульсным аксиальным током разных АВП получаем:

$$\Delta z_z^* = l_0 / (2\pi \bar{n}) = l_0 \ln n_m / [2\pi(n_m - 1)]. \quad (6)$$

Учитывая, что на длине  $\lambda_{enz}/2$  или  $\lambda_{enz}^*/2$  каждой квантованной дебройлевской электронной полуволны размещается один «горячий» и один «холодный» продольный участок рассматриваемого металлического проводника, из (2) с учетом (4) и (6) для наибольшего квантованного значения усредненной ширины  $\Delta z_x^*$  «холодного» продольного участка нашего металлического проводника с импульсным аксиальным током произвольных АВП находим:

$$\Delta z_x^* = l_0 / (\bar{n}) - l_0 / (2\pi \bar{n}) = l_0 \ln n_m (2\pi - 1) / [2\pi(n_m - 1)]. \quad (7)$$

Из (6) и (7) следует, что величина усредненной ширины  $\Delta z_x^*$  «холодного» участка металлического проводника с продольным импульсным током примерно в  $(2\pi - 1) \approx 5,3$  раз превышает усредненную ширину  $\Delta z_z^*$  его «горячего» участка. Кроме того, из этих приближенных расчетных выражений видно, что усредненные геометрические размеры «горячих» и «холодных» продольных участков проводника не зависят от АВП протекающего по ним импульсного тока, а определяются при его (нашего проводника) заданной длине  $l_0$  лишь величиной максимального значения  $n_m$  целого квантового числа  $n$ .

Экспериментально выявить в условиях научной лаборатории наличие «горячих» шириной  $\Delta z_z^*$  и «холодных» шириной  $\Delta z_x^*$  продольных участков в рассматриваемом металлическом проводнике можно, по мнению автора, только одним наглядным и реальным путем – путем пропускания по нему такого электрического тока, который вызывает интенсивный импульсный джоулев нагрев токопроводящего материала проводника. Причем, для опытного исследования такого нагрева проводника он должен быть без изоляции и содержать на его тугоплавком электропроводящем основании тонкое наружное легкоплавкое металлическое покрытие, закипающее и вспучивающееся на «горячих» продольных участках при протекании по проводнику тока большой плотности. Очевидно, что электрический ток в этом случае должен быть импульсным такой амплитуды и длительности, которые способны вызвать достижение в материале относительно тонкого проводника высоких температур.

**2 Определение основных усредненных характеристик для волнового радиального распределения дебройлевских полуволн в металлическом проводнике с импульсным аксиальным током различных АВП.** Распределение по текущему радиусу  $r$  принятого цилиндрического проводника с

импульсным аксиальным током разных АВП дебройлевских электронных полувольт в первом приближении удовлетворяет следующему соотношению [8]:

$$\lambda_{enr}/2 = r_0/n, \quad (8)$$

где  $\lambda_{enr} = h/(m_e v_{enr})$  – квантованная длина радиальной волны свободного электрона в проводнике;  $v_{enr} = nh/(2m_e r_0)$  – квантованная радиальная скорость свободного электрона в проводнике;  $n = 1, 2, 3, \dots, n_m$  – целое квантовое число, изменяющееся для свободных электронов в некотором диапазоне.

Из (2) и (8) вытекает важная электрофизическая особенность для волновых продольных и радиальных распределений свободных электронов в круглых сплошных цилиндрических металлических проводниках: как на их длине  $l_0$ , так и внешнем радиусе  $r_0$  всегда умещается целое квантованное число  $n$  электронных полувольт де Бройля соответствующих длин  $\lambda_{enz}/2$  или  $\lambda_{enr}/2$ . Положив согласно (4) для рассматриваемого распределения по радиусу  $r$  поперечного сечения  $S_0 = \pi r_0^2$  нашего проводника  $n = \bar{n} = (n_m - 1)/(\ln n_m)$  и воспользовавшись для радиально и стохастически перемещающихся в металлическом проводнике свободных электронов соотношением Гейзенберга в виде  $\Delta r_z \cdot \Delta p_{rm} \geq h/(4\pi)$ , где  $\Delta r_z$  – ширина «горячего» радиального участка проводника, а  $\Delta p_{rm} = m_e v_{enr} = nh/(2r_0)$  – квантованная радиальная проекция импульса дрейфующих в кристаллической микроструктуре проводника свободных электронов, для наименьшего квантованного значения усредненной ширины  $\Delta r_z^*$  относительно «горячего» радиального участка металлического проводника с импульсным аксиальным током различных АВП находим:

$$\Delta r_z^* = r_0 / (2\pi \bar{n}) = r_0 \ln n_m / [2\pi(n_m - 1)]. \quad (9)$$

Аналогично (7) с учетом (8) и (9) для наибольшего квантованного значения усредненной ширины  $\Delta r_x^*$  относительно «холодного» радиального участка круглого цилиндрического металлического проводника с импульсным аксиальным током произвольных АВП получаем следующее выражение:

$$\Delta r_x^* = r_0 / (\bar{n}) - r_0 / (2\pi \bar{n}) = r_0 \ln n_m (2\pi - 1) / [2\pi(n_m - 1)]. \quad (10)$$

Из (9) и (10) видно, что при радиальном волновом распределении в материале исследуемого проводника свободных электронов и соответствующих им ВЭП, как и для продольного волнового распределения в нем дрейфующих электронов и их ВЭП, в принятом нами приближении соотношение  $\Delta r_x^*/\Delta r_z^*$  также оказывается равным около  $(2\pi - 1) \approx 5,3$ . Полученные согласно выражениям (8)–(10) приближенные расчетные данные для «горячих» и «холодных» радиальных участков исследуемого проводника и соответствующие им различные температуры однозначно указывают на возможность радиального расслоения плазменных продуктов при электрическом взрыве металлических проводников за счет прямого воздействия на них больших импульсных токов

(БИТ). Так как практически всегда  $r_0 \ll l_0$ , то на основании полученных расчетных выражений (6), (7), (9) и (10) можно заключить, что мелкодисперсные радиальные фракции продуктов взрыва тонких металлических проводочков от прямого действия на них БИТ в отличие от образующихся при этом электрофизическом явлении мелкодисперсных продольных фракций будут иметь значительно меньшие габаритные размеры (примерно в  $l_0/r_0$  раз).

**3 Некоторые результаты экспериментальной проверки волнового продольного распределения дрейфующих электронов в металлическом проводнике с импульсным током большой плотности.** На взгляд автора, указанным выше в разделе 1 необходимым для проведения соответствующих экспериментов техническим условиям удовлетворяют промышленно выпускаемый по ГОСТ 3282-74 оцинкованный стальной провод [14] и мощная высоковольтная конденсаторная электроустановка – генератор импульсных токов типа ГИТ-5 (номинальное зарядное постоянное напряжение  $U_{3Г} = \pm 5$  кВ; номинальная запасаемая электрическая энергия  $W_{Г} = 567$  кДж), воспроизводящий на электрической активно-индуктивной нагрузке длительную апериодическую компоненту тока линейной молнии (амплитуда  $I_{0m}$  импульса тока до 0,8 кА; протекающий электрический заряд  $Q_i$  до  $(200 \pm 20)$  Кл; полная длительность импульса  $\tau_p$  до 1000 мс) [15]. На рис. 2 и 3 приведены результаты электротермического воздействия на выбранный стальной провод с цинковым покрытием толщиной  $\Delta_0 = 5$  мкм ( $r_0 = 0,8$  мм;  $l_0 = 320$  мм), включенный в разрядную цепь генератора ГИТ-5 ( $U_{3Г} = -3,7$  кВ;  $W_{Г} = 310$  кДж), апериодического импульса тока временной формы  $t_m/\tau_p = 9$  мс/576 мс ( $t_m$  – время, соответствующее токовой амплитуде  $I_{0m}$ ) большой плотности ( $I_{0m} = -745$  А;  $\delta_{0m} = |I_{0m}|/S_0 = 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>). От такого импульса тока провод разрушился.



Рисунок 2 – Опытное распределение вдоль электротермически разрушенного оцинкованного стального провода ( $r_0 = 0,8$  мм;  $l_0 = 320$  мм;  $\Delta_0 = 5$  мкм) «горячих» (макроскопических зон ВЭП провода) и «холодных» продольных гантелеобразных участков, испытывающих воздействие апериодического импульса аксиального тока временной формы 9 мс/576 мс большой плотности ( $\delta_{0m} = 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>;  $n_m = 32$ ;  $\bar{n} = 9$ ) [7]

На рис. 2 и 3 четко видны четыре «горячих» (опытной шириной  $\Delta z_x^* = 7$  мм при расчетной по (6) ширине для  $\bar{n} = 9$  в 5,7 мм) и два «холодных» (опытной шириной  $\Delta z_x^* = 27$  мм при расчетной по (7) ширине для  $\bar{n} = 9$  в 29,9 мм) продольных участка стального провода. Остальные пять «горячих» и восемь «холодных» продольных участка испытываемого провода подверглись при указанном значении в нем плотности импульсного тока ( $\delta_{0m} = 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>) полной сублимации. Приведенные на рис. 2 и 3 экспериментальные результаты продольного волнового распределения ВЭП и соответствующих им «горячих» и «холодных» продольных участков в круглом сплошном цилиндрическом проводе хорошо согласуются с выполненными по (6) и (7) расчетными оценками усредненных геометрических характеристик указанных участков.



Рисунок 3 – Внешний вид остывающих «горячих» (бывших макроскопических зон ВЭП провода) и «холодных» продольных гантелеобразных участков электротермически разрушенного оцинкованного стального провода ( $r_0 = 0,8$  мм;  $l_0 = 320$  мм;  $\Delta_0 = 5$  мкм), по которому протекал аperiодический импульсный аксиальный ток временной формы 9 мс/576 мс большой плотности ( $\delta_{0m} = 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>;  $n_m = 32$ ;  $\bar{n} = 9$ ) [7]

## Выводы

Выполненные квантомеханические расчетные оценки и проведенные с помощью мощного высоковольтного оборудования высокотемпературные эксперименты подтверждают возможность практического использования при исследовании волнового продольного распределения дрейфующих свободных электронов и соответственно электрического тока проводимости в металлических проводниках с импульсным аксиальным током большой плотности усредненных геометрических характеристик для подобных распределений.

**Список литературы:** 1. Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // Электротехника. – 2005. – № 7. – С. 25–33. 2. Баранов М.И. Энергетический и частотный спектры свободных электронов проводника с электрическим током проводимости // Электротехника. – 2006. – № 7. – С. 29–34. 3. Баранов М.И. Новые физические подходы и механизмы при изучении процессов формирования и распределе-

ния электрического тока проводимости в проводнике // *Технічна електродинаміка*. – 2007. – № 1. – С. 13–19. **4. Баранов М.И.** Эвристическое определение максимального числа электронных полуоволн де Бройля в металлическом проводнике с электрическим током проводимости // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2007. – № 6. – С. 59–62. **5. Баранов М.И.** Волновой электронный пакет проводника с электрическим током проводимости // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2006. – № 3. – С. 49–53. **6. Баранов М.И.** Квантовомеханический подход при расчете температуры нагрева проводника электрическим током проводимости // *Технічна електродинаміка*. – 2007. – № 5. – С. 14–19. **7. Баранов М.И.** Исследование стохастического распределения электронных полуоволн де Бройля и волновых пакетов в проводнике с импульсным током проводимости большой плотности // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2008. – № 5. – С. 44–49. **8. Баранов М.И.** Волновое радиальное распределение свободных электронов в цилиндрическом проводнике с переменным электрическим током // *Технічна електродинаміка*. – 2009. – № 1. – С. 6–11. **9. Столович Н.Н.** Электровзрывные преобразователи энергии / Под ред. *В.Н. Карнюшина*. – Минск: Наука и техника, 1983. – 151 с. **10. Лебедев С.В., Савватимский А.И.** Металлы в процессе быстрого нагревания электрическим током большой плотности // *Успехи физических наук*. – 1984. – Том 144, вып. 2. – С. 215–250. **11. Яворский Б.М., Детлаф А.А.** Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с. **12. Кузьмичев В.Е.** Законы и формулы физики / Отв. ред. *В.К. Тартаковский*. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с. **13. Двайт Г.Б.** Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.: Наука, 1973. – 228 с. **14.** Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / *Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева* : Под ред. *Н.И. Белоруссова*. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с. **15. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И.** и др. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // *Приборы и техника эксперимента*. – 2008. – № 3. – С. 81–85.

*Поступила в редколлегию 29.08.2013*

УДК 621.3.022:537.311.8:621.7.044.7

**Усредненные характеристики волнового распределения дрейфующих электронов в металлическом проводнике с импульсным током проводимости большой плотности / М.И. Баранов, С. В. Рудаков** // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 60 (1033). – С. 12–20. – Бібліогр.: 15 назв.

Представлені деякі результати теоретичного і експериментального дослідження основних геометричних характеристик хвильового подовжнього і радіального розподілу вільних електронів, що дрейфують, в однорідному циліндровому металевому провіднику з імпульсним аксіальним струмом великої щільності.

**Ключові слова:** провідник, вільні електрони, імпульсний струм, електронні хвилі, характеристики подовжнього і радіального розподілу електронів.

Some results of theoretical and experimental research of basic geometrical descriptions of the wave longitudinal and radial distributing of drifting lone electrons are presented in a homogeneous cylindrical metallic explorer with the impulsive axial-flow current of high-slay.

**Key words:** explorer, lone electrons, impulsive current, electronic waves, descriptions of the longitudinal and radial distributing of electrons.

**М. И. БАРАНОВ**, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
**Н. В. ВЕСЕЛОВА**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## **УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ «ХФТИ» – СРЕДОТОЧИЕ ТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОФИЗИКИ ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Приведены краткие научно-исторические данные, показывающие важную роль техники и электрофизики высоких и сверхвысоких электрических напряжений при разработке и создании в Харьковском физико-техническом институте мощных линейных ускорителей протонов, электронов и ионов.

**Ключевые слова:** ускорители заряженных частиц, протоны, электроны, ионы, сильное электрическое поле, высокое и сверхвысокое электрическое напряжение.

**Введение.** Результаты расчетных оценок и физических экспериментов показывают, что для осуществления в веществе большинства ядерных реакций требуются ускоренные до огромных скоростей ионы и основные элементарные частицы (отрицательно заряженные относительно «легкие» электроны массой покоя  $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг, положительно заряженные «тяжелые» протоны массой  $m_p = 1836 m_e$  и получаемые с помощью непосредственной бомбардировки ими ряда «тяжелых» химических элементов электрически нейтральные «тяжелые» нейтроны массой  $m_n = 1839 m_e$ ) [1]. В истории развития мировой физики так сложилось, что роль физико-технических устройств, разгоняющих в высоком вакууме указанные заряженные частицы вещества до требуемых скоростей (энергий), стали выполнять специальные сложные и дорогостоящие крупногабаритные радиоэлектронные устройства высокого и сверхвысокого электрического напряжения – ускорители заряженных частиц (УЗЧ) [1,2]. По физическому принципу работы любой УЗЧ практически аналогичен работе гигантской высоковольтной электровакуумной лампы, содержащей изолированные друг от друга металлические электроды, на которые в необходимый момент времени подается ускоряющее заряженную частицу высокое (сверхвысокое) электрическое напряжение [2]. За счет создания в вакууме между ускоряющими электродами УЗЧ сильного электрического поля с напряженностью не менее  $10^5$  В/м и возникновения за счет ее действия на заряженную частицу электрической силы именно и происходит ее ускорение. При этом энергия электрического поля преобразуется в кинетическую энергию частицы, направляемой на ядерную мишень. В этом случае необходимо не забывать о том, что ускоряемые заряженные элементарные частицы являются квантовыми объектами, обладающими одновременно корпускулярными и волновыми свойствами. Как видим, в основе функционирования УЗЧ

© М. И. Баранов, Н. В. Веселова, 2013

лежат фундаментальные электрофизические принципы, базирующиеся на законах классической и квантовой физики. История создания УЗЧ свидетельствует о том, что при их конструировании специалистами используются самые передовые на соответствующий исторический момент времени научные физические и технические знания человечества и передовые технологии [3,4]. На наш взгляд, определенный интерес представляет задача об установлении тесной взаимосвязи высоковольтной техники и УЗЧ. Проследим эту взаимосвязь на примере работ в области УЗЧ Украинского физико-технического института (УФТИ).

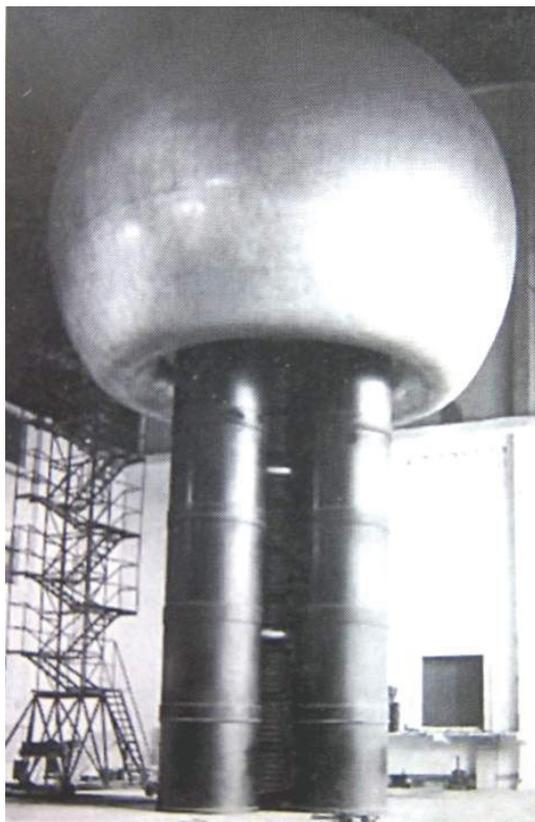


Рисунок 1 – Внешний вид крупнейшего в довоенной Европе электростатического ускорителя протонов типа ЭСУ-3,5 на их энергию от 3,5 до 7 МэВ с вертикальной вакуумной ускорительной трубкой длиной 15 м и электрическим потенциалом металлического шарообразного кондуктора диаметром 10 м до 5 МВ (УФТИ, 1936 год) [5]

**1 Первоначальный этап создания в УФТИ линейных УЗЧ.** На рис. 1 приведен общий вид электростатического ускорителя (ЭСУ) типа ЭСУ-3,5 [5].

Напомним читателю, что УФТИ был создан в 1928 году специальным постановлением Совнаркома СССР [4,5]. Именно УФТИ и стал научным центром по развитию в СССР высоковольтной ускорительной техники. Уже со второй половины 1931 года в УФТИ были начаты работы по созданию научно-технической базы для проведения экспериментов в области ядерной физики с помощью заряженных частиц, искусственно ускоренных сильным электрическим полем. Важным событием в истории УФТИ следует считать 17 октября 1934 года, когда дирекцией этого института был издан приказ «Об организации работ по сооружению экспериментального генератора Ван де Граафа на 7 МэВ» [5,6]. На основании этого приказа в 1936 году в УФТИ под научным руководством будущих академиков АН УССР Антона Карловича Вальтера (1905-1965 гг.) и Кирилла Дмитриевича Синельникова (1901-1966 гг.) впервые в Европе был сооружен электростатический ускоритель протонов на основе использования генератора по электрической схеме выдающегося американского физика Роберта Ван де Граафа (1901-1967 гг.) [4] на их энергию от 3,5 до 7 МэВ (ЭСУ-3,5) с шаровым кондуктором (металлическим электродом) диаметром 10 м (см. рис. 1) [3,6]. Постоянный электрический потенциал этого генератора достигал до 5 МВ [4,5]. На ускорителе ЭСУ-3,5 только в 1937 году был выполнен большой комплекс ядерных исследований по изучению взаимодействия ускоренных протонов с твердым веществом. На основе материалов этих исследований Вальтером А.К. была защищена докторская диссертация [5,6]. Отметим и то, что в УФТИ на основе собственных разработок к концу 1950 года был создан электростатический ускоритель протонов на энергию до 5 МэВ типа ЭСУ-5 (рис. 2). Электрический потенциал высоковольтного металлического кондуктора ЭСУ-5 достигал до 3 МВ [5,7]. Заметим, что в период 1950-1960 гг. на электростатическом ускорителе ЭСУ-5 в УФТИ был выполнен огромный объем ядерно-физических исследований [5,7].

В послевоенные годы, начиная практически с 1946 года, в УФТИ был выполнен большой комплекс работ по высокочастотным генераторам электромагнитных волн, необходимым для линейных УЗЧ [8,9]. В 1952-1954 гг. на основе результатов этих работ под научным руководством д-ра физ.-мат. наук Гришаева И.А. в УФТИ был создан первый линейный ускоритель электронов (ЛУЭ) на бегущей электромагнитной волне с замедляющей системой типа волновода на энергию до 0,7 МэВ и затем вскоре до 3,5 МэВ [5,8]. В течение 1950-х годов в УФТИ был создан ряд линейных ускорителей протонов (ЛУП) на энергию 5,5 МэВ (ЛУП-5,5) и 8 МэВ (ЛУП-8), выполняющих роль инжектора для циклических УЗЧ – синхрофазотронов [5]. Укажем, что в 1956 году в УФТИ под научным руководством Синельникова К.Д., Вальтера А.К. и Гришаева И.А. был построен ЛУЭ на энергию электронов до 30 МэВ (ЛУЭ-30), который состоял из двух взаимосвязанных между собой секций – инжекторной секции и основной ускоряющей высоковольтной секции [7,10]. Кроме того, в 1958 году в УФТИ этими учеными был создан ЛУЭ на энергию

90 МэВ (ЛУЭ-90), на котором были выполнены исследования по фотоядерным реакциям [5,7].

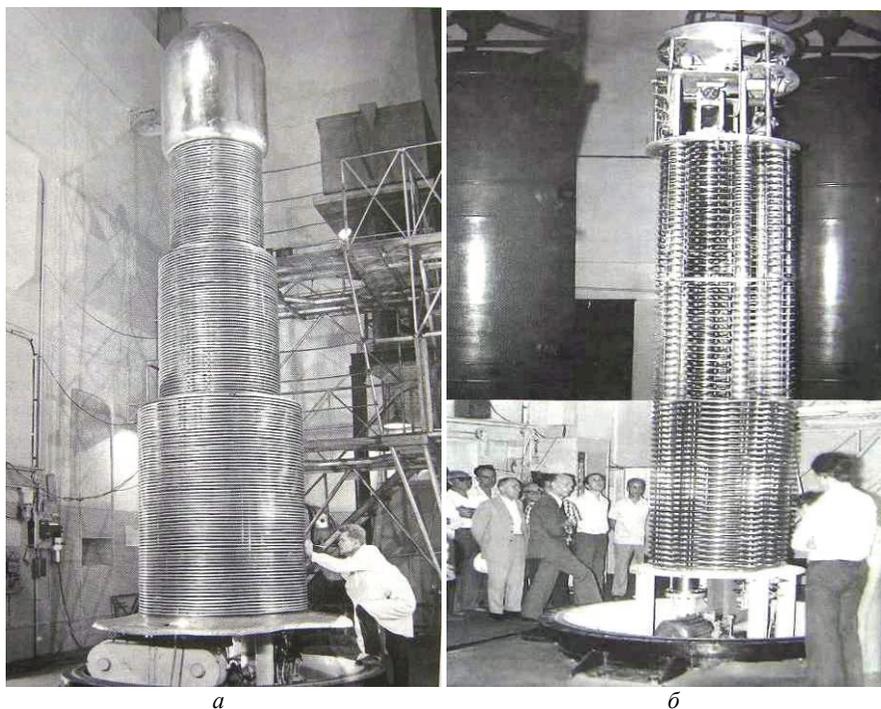


Рисунок 2 – Внешние виды электростатического ускорителя протонов типа ЭСУ–5 (потенциал на кондукторе – до 3 МВ; ток пучка – до 50 мкА; давление газа ( $N_2 + 5\% SF_6$ ) в котле – до 6 атм.; давление вакуума в ускорительной трубке –  $2 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст.): а – колонны ускорителя без корпуса-котла и двух промежуточных экранов (УФТИ, 1954 год); б – колонны ускорителя после его реконструкции (УФТИ, 1968 год; первый слева – чл.-корр. АН УССР Хижняк Н.А., пятый – чл.-корр. АН СССР Иванов В.Е.) [5]

В 1958 году в УФТИ АН УССР благодаря самоотверженной работе многих его сотрудников, включая Зейдлица П.М., Болотина Л.И., Ильевского С.А., Ревуцкого Е.И. и Бомко В.А., с использованием ряда оригинальных высоковольтных устройств был построен линейный ускоритель тяжелых многозарядных ионов типа «ЛУМЗИ», общий вид которого показан на рис. 3 [5,11]. Отметим то немаловажное обстоятельство, что с использованием этого типа УЗЧ для тяжелых многозарядных ионов в настоящее время в данном институте продолжают работы по совершенствованию ускоряющих структур, разработке, исследованию и внедрению новых перспективных методов ускорения заряженных частиц. Сейчас на реконструированном ускорителе тяжелых ионов типа «ЛУМЗИ» харьковскими учеными совместно с их зарубеж-

ными коллегами отрабатываются новые прикладные и фундаментальные направления для ядерно-физических исследований в области радиационного материаловедения (например, изучение пластических характеристик конструкционных материалов после их облучения пучком ионов, исследование трековых (ядерных) мембран и производства радионуклидов для медицинских целей) и ядерной физики (например, изучение взаимодействия тяжелых ионов) [5,11].

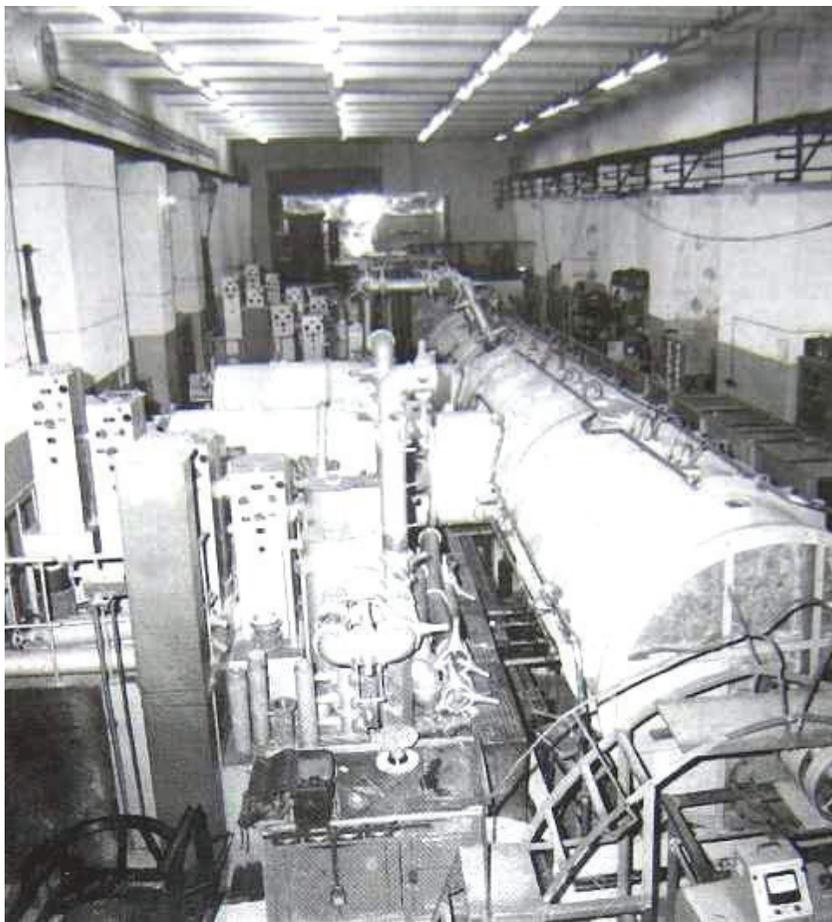


Рисунок 3 – Внешний вид линейного ускорителя тяжелых многозарядных ионов типа «ЛУМЗИ» на энергия до 8 МэВ/нуклон и импульсный ток пучка ионов азота до 50 мкА (УФТИ, 1958 год) [5,11]

В 1965 году в УФТИ АН УССР был построен крупнейший в свое время в Европе 50-ти секционный линейный ускоритель электронов на энергию до

2 ГэВ (ЛУЭ-2000), фрагмент которого приведен на рис. 4. Этот сверхмощный ускоритель электронов остался крупнейшим ЛУЭ на территории СССР [5,8].

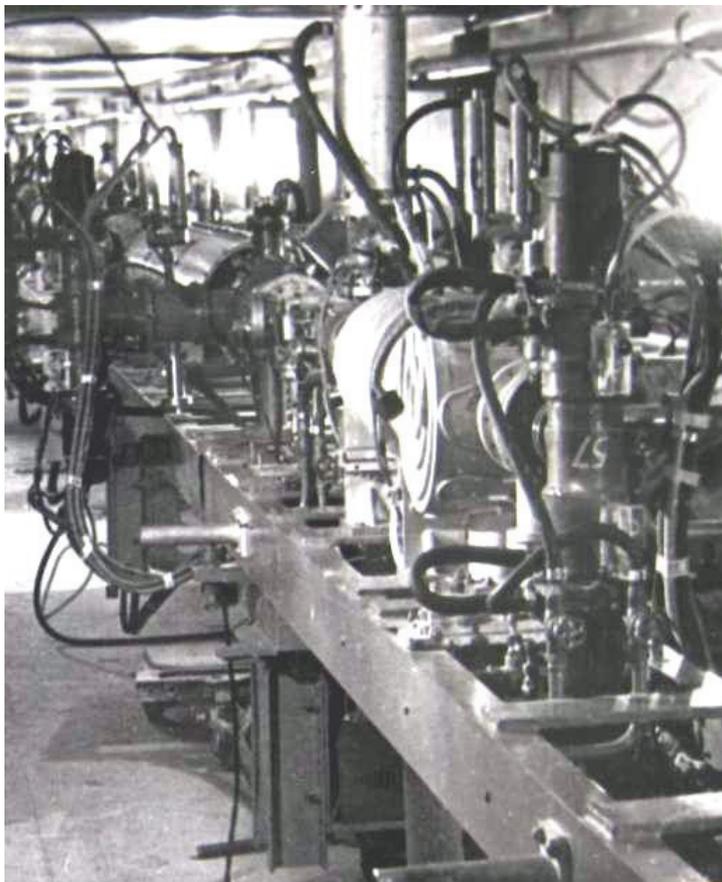


Рисунок 4 – Внешний вид фрагмента крупнейшего в 1960-х годах в Европе сверхмощного 50-ти секционного линейного ускорителя электронов типа ЛУЭ-2000 на энергию этих элементарных частиц до 2 ГэВ и импульсный ток электронного пучка до 100 мА при длительности его импульса – 1,5 мкс (УФТИ, 1965 год) [5,8]

**2 Современный этап создания в ХФТИ линейных УЗЧ.** В 1987 году для решения ряда прикладных и фундаментальных задач в области физики высоких энергий и ядерной физики, а также для разработки новых радиационных технологий в Харьковском физико-техническом институте (ХФТИ, бывшем УФТИ) АН УССР был построен малогабаритный линейный ускоритель электронов типа ЛУЭ-10 на энергию ускоряемых частиц (8–18) МэВ (рис. 5) [5]. Данный ускоритель использовался для проведения фундамен-

тальных и прикладных исследований в области радиационных повреждений различных материалов и отработки новых технологий радиационного назначения [5,13].

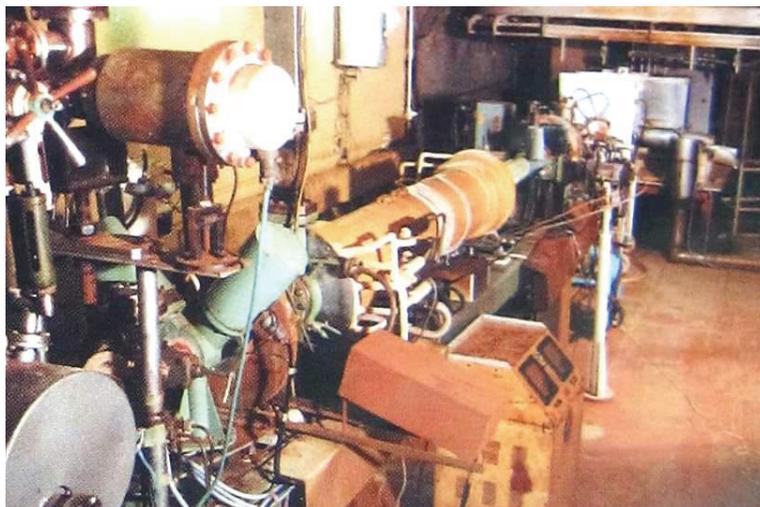


Рисунок 5 – Внешний вид малогабаритного линейного ускорителя электронов типа ЛУЭ-10 на энергию данных элементарных частиц до 18 МэВ и импульсный ток электронного пучка до 1 А при длительности его импульса –3,5 мкс (ХФТИ, 1987 год) [5]

В 1993 году в ХФТИ АН Украины был создан малогабаритный технологический ускорительный комплекс (КУТ) с вертикальной установкой ускорительной вакуумной трубки на энергию генерируемого им пучка электронов до 9 МэВ для отработки перспективных промышленных радиационных технологий (рис. 6) [5]. Далее в 1999 году для решения ряда прикладных задач и разработки новых радиационных технологий в Национальном научном центре (ННЦ) «ХФТИ» НАН Украины был построен малогабаритный линейный ускоритель электронов типа ЛУЭ-20 «ЭПОС» на энергию электронов до (20–35) МэВ [5]. В 2002 году для решения некоторых актуальных прикладных задач и разработки перспективных радиационных технологий учеными ННЦ «ХФТИ» НАНУ был разработан и построен компактный линейный ускоритель КУТ-20 на энергию электронов до (20–30) МэВ и импульсный ток электронного пучка до 1 А [5]. В последние годы в рамках международного сотрудничества с Юлихским научным центром (Германия) ННЦ «ХФТИ» НАНУ для проведения совместных ядерных исследований в области радиационного материаловедения был передан электростатический ускоритель «ELIAS» [5,13], общий вид основных элементов которого приведен на рис. 7. Большой вклад в приобретение, монтаж и запуск в эксплуатацию в ННЦ «ХФТИ» НАНУ этого современного ускорителя внесли директор Института

физики высоких энергий и ядерной физики ННЦ «ХФТИ» НАНУ, чл.-корр. НАН Украины, проф. Довбня Анатолий Николаевич, генеральный директор ННЦ «ХФТИ» НАНУ, академик НАН Украины, проф. Неклюдов Иван Матвеевич и другие харьковские ученые и специалисты в области экспериментальной и ядерной физики.

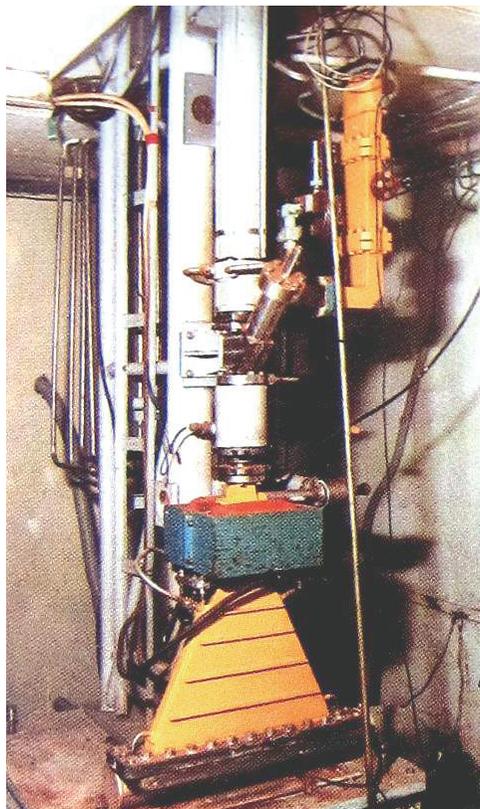


Рисунок 6 – Внешний вид малогабаритного ускорителя электронов типа КУТ с вертикальной установкой ускорительной трубки (энергия элементарных частиц – до 9 МэВ; импульсный ток – до 0,8 А при длительности импульса – 4 нс; ХФТИ, 1993 год) [5,8]

В настоящее время в ННЦ «ХФТИ» НАН Украины (точнее в Институте плазменной электроники и новых методов ускорения, возглавляемом д-ром физ.-мат. наук Егоровым Алексеем Михайловичем) активно проводятся работы по радикальному усовершенствованию линейных УЗЧ [14]. Здесь были разработаны и созданы ускорители протонов и ионов с использованием переменного-фазовой фокусировки, отмеченные в 1996 году Государственной премией Украины в области науки и техники [14]. Именно в этом институте

совместно с российскими учеными было разработано новое направление в физике ускорителей – коллективные методы ускорения частиц [14]. В рамках этого нового направления в ускорении элементарных частиц в ННЦ «ХФТИ» НАН Украины был разработан ряд мощных СВЧ-генераторов и новых типов ускоряющих структур, объединивших в себе преимущества традиционных вакуумных структур и плазменных систем. Здесь было создано семейство сильноточных ускорителей электронов с энергией до 1 МэВ и импульсными токами до 100 кА [14].



Рисунок 7 – Внешний вид основных элементов электростатического ускорителя заряженных элементарных частиц типа «ELIAS» (ННЦ «ХФТИ», 2010 год) [5,6,13]

На основе импульсных сильноточных релятивистских ускорителей электронов в ННЦ «ХФТИ» НАН Украины в последние годы был создан ряд сверхмощных СВЧ-генераторов в широком диапазоне частот мощностью до 1 ГВт (релятивистские карсинотроны, магнетроны, виркаторы и убитроны) [14].

В ННЦ «ХФТИ» НАН Украины одной из последних разработок в области физики высоких энергий и УЗЧ является исследовательская ядерная установка «Источник нейтронов, основанный на подкритической урановой сборке, управляемой линейным ускорителем электронов» [15]. Эта установка создается в настоящее время на производственной территории ННЦ «ХФТИ» совместно с Аргонской национальной лабораторией (США) и Институтом физики высоких энергий (Китай). Первичный поток нейтронов в ней образуется в результате фотоядерных реакций в ядерной мишени из вольфрама или природного урана, бомбардируемой внешним от ЛУЭ интенсивным электронным пучком мощностью до 100 кВт при энергии ускоренных электронов до 100 МэВ [15]. Данный мощный источник нейтронов предназначен для научных и прикладных совместных исследований отечественных и зарубежных специалистов в области ядерной физики, физики конденсированного состояния вещества, радиационного материаловедения, биологии, производства медицинских радиоизотопов и трансмутации различных радионуклидов [15].

**Выводы.** Показана важная физико-техническая роль техники высоких и сверхвысоких постоянных и импульсных электрических напряжений при разработке и создании мощных сильноточных линейных УЗЧ. Отмечен значительный вклад научной школы ХФТИ НАНУ в развитие отечественной высоковольтной ускорительной техники, физики высоких энергий и ядерной физики.

**Список литературы:** 1. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с. 2. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Х.: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 252 с. 3. Иванов И.Н., Лебедев А.Н. Введение в теорию ускорителей. Ускорители заряженных частиц – от В.И. Векслера до наших дней. – М.: Наука, 2001. – С. 133–146. 4. Храмов Ю.А. История физики. – К.: Феникс, 2006. – 1176 с. 5. Айзацкий Н.И., Аркатов Ю.М., Бомко В.А. и др. Харьковский физико-технический институт – колыбель ядерной физики и ускорителей заряженных частиц в СССР. К 70-летию расщепления атомного ядра (1932-2002 гг.) / Под общей ред. проф. Довбни А.Н. – Х.: 2002. – 43 с. 6. Таньшина А.В. Основатели Харьковских научных школ в физике. Учеб. пособие по истории физики. Ч.1. – Х.: Изд-во Харьков. Нац. ун-та им. В.Н. Каразина, 2002. – 512 с. 7. Электростатические генераторы / Сборник статей под ред. А.К. Вальтера. – М.: 1959. – 255 с. 8. Довбня А.Н., Егоров А.М., Ранюк Ю.Н. и др. К пятидесятилетию запуска первого линейного ускорителя электронов в ННЦ «ХФТИ» // Вопросы атомной науки и техники. – 2001. – № 3. – С. 3–5. 9. Толоч В.Т. Физика и Харьков // Журнал «Университеты: Наука и просвещение». – 2004. – № 1. – С. 42–53. 10. Электронные ускорители. Труды 3-ей межвузовской конференции. – Томск: 1961. – 419 с. 11. Бомко В.А., Егоров А.М., Зайцев Б.В. и др. Развитие комплекса «ЛУМЗИ» для ядерно-физических исследований // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 3. – С. 100–104. 12. Ранюк Ю.Н., Шевченко О.С. Лаборатория № 1 и атомный проект СССР. Документы и материалы (1938-1956 гг.). – Х.: ННЦ «ХФТИ», 2011. – 370 с. 13. [http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Харьковский\\_физико-технический\\_институт](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Харьковский_физико-технический_институт). 14. <http://www.kipt.kharkov.ua/ipenma.html>. 15. Айзацкий Н.И., Демченко П.А., Неклюдов И.М. и др. Источник нейтронов ННЦ «ХФТИ» // Вопросы атомной науки и техники. – 2012. – № 3. – С. 3–9.

*Поступила в редколлегию 19.09.2013*

УДК 621.3:537.311:910.4

**Ускорители заряженных частиц «ХФТИ» – средоточие техники и электрофизики высоких и сверхвысоких напряжений / М.И. Баранов, Н.В. Веселова // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПИ», 2013. – № 60 (1033). – С. 21–30. – Бібліогр.: 14 назв.**

Приведені короткі науково-історичні дані, що показують важливу роль техніки і електрофізики високої і надвисокої електричної напруги при розробці і створенні в Харківському фізико-технічному інституті потужних лінійних прискорювачів протонів, електронів і іонів.

**Ключові слова:** прискорювачі заряджених частинок, протони, електрони, іони, сильне електричне поле, висока і надвисока електрична напруга.

Short scientifically-historical information, showing the important role of technique and electrophysics of high and over high electric voltage at development and creation in the Kharkov physical-technical institute of the powerful linear accelerating of protons, electrons and ions, is resulted.

**Key words:** accelerating of the charged particles, protons, electrons, ions, strong electric field, high and over high electric voltage.

**Г. А. БАРБАШОВА**, канд. физ.-мат. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

**А. И. ВОВЧЕНКО**, д-р техн. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТОМ ЦИЛИНДРЕ ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ**

С помощью численных методов исследовано давление в канале разряда и жидкости в цилиндрическом замкнутом объеме с толстыми стенками во время высоковольтного электрического разряда. Сделана оценка влияния энергии, которая образуется во время окисления алюминиевой пудры, на величину давления.

**Ключевые слова:** канал разряда, электрический разряд, давление.

### **1 Введение**

В некоторых разрядноимпульсных технологиях (например, разрушение негабаритов и сейсмоакустическое профилирование морского дна) для увеличения вводимой энергии используют электрический разряд в химически активных конденсированных средах – высоковольтный электрохимический взрыв (ВЭХВ) [1]. ВЭХВ реализуется при введении в зону канала разряда веществ, способных к экзотермическим химическим превращениям под действием высоких температур и давлений в плазменном канале. В результате таких превращений энергия, выделяющаяся при химических реакциях, суммируется с электрической, увеличивая интегральную энергию.

В монографии [1] авторами обобщены результаты экспериментальных исследований процессов ВЭХВ в воде. При выполнении экспериментов диэлектрическую трубочку заполняли экзотермической смесью (ЭС), в состав которой входили порошок алюминия, алюминиевая пудра и водный раствор окислителя. Трубочку помещали в промежуток между электродами. После подачи высокого напряжения происходил пробой ЭС, в результате чего образуется канал сквозной проводимости. Продолжительность прогрева алюминиевой пудры составляет порядка  $10^{-8}$  с [2], то есть экзотермическая реакция начинается еще в процессе ввода электрической энергии. Время горения используемых порошков составляет несколько миллисекунд [2], поэтому энергия, получаемая при окислении порошка, расходуется, в основном, на увеличение энергии парогазовой полости. В работе [1] рассмотрено несколько вариантов состава ЭС и определено, что больше всего тепловой энергии выделяется в том случае, когда смесь состоит из 60 % порошка алюминия (из них

15 % составляет пудра) и 40 % окислителя. Там же приводится зависимость давления в окружающей канал разряда жидкости, необходимого для самоподдерживающейся экзотермической реакции, от процентного содержания алюминия в ЭС. Эта зависимость получена сотрудниками РХТУ им. Д.И. Менделеева. В случае 60 % содержания алюминия, согласно приводимым данным, необходимое давление должно быть не менее 22,5 МПа. Приводимые в [1] результаты определены при электрическом разряде в камере больших размеров. Но интенсивное использование в настоящее время ВЭХВ в строительстве (технология для устройства свай и анкером [3]), при разрушении негабаритов [4] и в других технологиях предусматривает его выполнение в ограниченных, причем часто малых, объемах. Поэтому актуален вопрос исследования процессов, сопровождающих ВЭХВ, в таких объемах.

Целью настоящей работы является изучение давления жидкости в цилиндрическом замкнутом объеме с толстыми стенками при высоковольтном электрическом разряде при помощи вычислительного эксперимента. В частности, оценка влияния энергии, выделяющейся при окислении алюминиевой пудры, на величину давления.

## 2 Постановка задачи и метод ее решения

При построении математической модели полагали, что цилиндрический замкнутый объем (разрядная камера) имеет жесткие неподвижные стенки и заполнен идеальной сжимаемой жидкостью; трубочка с ЭС находится на оси симметрии (в центре) цилиндра; образующийся при ВЭХВ канал разряда заполнен идеальной низкотемпературной плазмой в период ввода энергии и идеальным газом после окончания ее ввода. Полагали также, что алюминиевая пудра сгорела во время ввода электрической энергии.

Соответствующая принятым допущениям математическая модель включает в себя:

- систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики [5]:

$$\frac{\partial(rF_1)}{\partial t} + \frac{\partial(rF_2)}{\partial z} + \frac{\partial(rF_3)}{\partial r} = F_4;$$

$$F_1 = [\rho, \rho v_r, \rho v_z, e]^T; \quad F_2 = [\rho v_z, \rho v_z v_r, \rho v_z^2 + p, (e+p)v_z]^T;$$

$$F_3 = [\rho v_r, \rho v_r^2 + p, \rho v_r v_z, (e+p)v_r]^T; \quad F_4 = [0, p, 0, 0]^T;$$

- двучленное уравнение состояния [5]:

$$\varepsilon = [p - c_0^2(\rho - \rho_0)] / [\rho(\kappa - 1)];$$

- уравнение баланса энергии в канале разряда [6]:

$$1/(\gamma - 1) d(p_a(t) \cdot V(t)) / dt + p_a(t) \cdot dV(t) / dt = N(t);$$

- условия динамической совместности на ударной волне [5]:

$$[\rho]D - [\rho v_n] = 0;$$

$$[\rho v_n]D - [\rho v_n^2 + p] = 0;$$

$$\left[\rho \left(\varepsilon + v_n^2 / 2\right)\right] D - \left[\rho v_n \left(\varepsilon + v_n^2 / 2\right) + p v_n\right] = 0;$$

– условие непротекания на неподвижной жесткой поверхности [5]:

$$v_n = 0.$$

Здесь  $t$  – время;  $r, z$  – цилиндрические координаты;  $v_r, v_z, v_n$  – радиальная, осевая и нормальная компоненты вектора скорости жидкости;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность;  $e = \rho \left[ \varepsilon + (v_r^2 + v_z^2) / 2 \right]$ ,  $\varepsilon$  – удельная внутренняя энергия;  $\kappa = 7,15$ ;  $\rho_0, c_0$  – плотность и скорость звука в покоящейся жидкости;  $\gamma = 1,26$ ;  $p_a(t), V(t)$  – давление в канале разряда и его объем;  $N(t)$  – вводимая в разрядный канал мощность;  $D$  – скорость ударной волны;  $[f] = f_1 - f_2$ ;  $f_1, f_2$  – значения функции слева и справа от ударной волны.

Начальные значения гидродинамических параметров равны своим значениям в невозмущенной среде при нормальных условиях. Задача решается конечно-разностным методом Годунова [5]. Стенка канала разряда является внутренней границей расчетной области, а внешней границей – сначала ударная волна, а после достижения волной стенки цилиндра – жесткая поверхность.

### 3 Результаты решения задачи

Схема разрядной камеры показана на рис. 1. Здесь 1 – поверхность цилиндра, 2 – заполняемая ЭС трубочка.

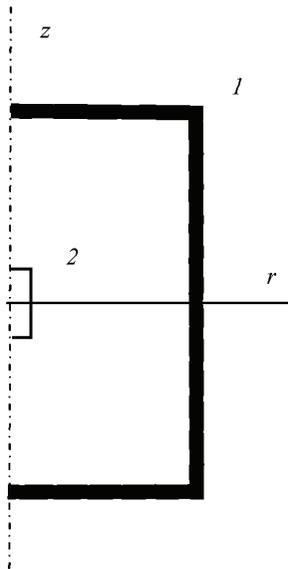


Рисунок 1 – Схема разрядной камеры

Закон ввода энергии в канал разряда в связи с отсутствием эксперимен-

тальных зависимостей разрядного тока и напряжения на канале разряда в замкнутом объеме моделировался треугольником [6]. В данном случае это допустимо, поскольку при ВЭХВ, как было установлено в работе [1], форма зависимости мощности от времени близка к равнобедренному треугольнику. Электрическая энергия вычислялась при следующих параметрах электрической цепи [1]: начальное напряжение  $U_0 = 20$  кВ, емкость конденсаторной батареи  $C = 3$  мкФ, индуктивность разрядной цепи  $L = 3,4$  мкГн, длина межэлектродного промежутка  $l = 0,04$  м. Величина энергии при этом равна 600 Дж. Энергия, получаемая при сгорании алюминиевой пудры, определялась следующим образом. Известно, что при сгорании 1 г алюминия выделяется примерно 31 кДж энергии, а масса используемой ЭС равна 0,3 г [1] и содержит 0,027 г пудры, поэтому при сгорании пудры выделяется 837 Дж. Законы ввода энергии в канал разряда приведены на рис. 2 (линия 1 – вводимая электрическая энергия, 2 – суммарная энергия).

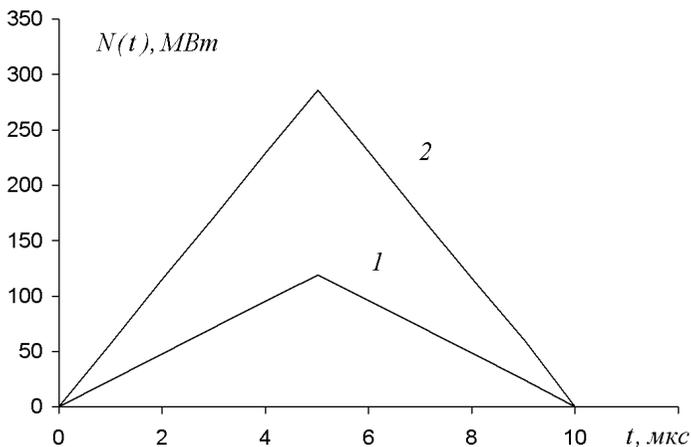


Рисунок 2 – Закон ввода энергии в канал разряда

Были выполнены расчеты в неограниченном пространстве и в цилиндрической разрядной камере, длина которой равна 0,3 м, а диаметр – 0,07 м и 0,045 м. При этом рассматривался электрический разряд в воде с учетом и без учета энергии, получаемой при сгорании алюминиевой пудры.

Рассмотрим сначала результаты расчетов при электрическом разряде без учета энергии, получаемой в результате химической реакции. После замыкания межэлектродного промежутка образуется заполненная плазмой полость – канал разряда. Давление в ней значительно выше давления в окружающей среде. Канал начинает расширяться. Образовавшаяся при этом волна сжатия и следующий за ней гидросток распространяются по всему объему разрядной камеры. Отраженные от поверхности цилиндра волны давления приходят к каналу и сжимают его, повышая давление вещества в канале. Как

только это давление превысит давление в окружающей жидкости, начинается новое расширение канала. Давление в канале разряда в рассмотренных замкнутых объемах и в жидкости зависит от диаметра цилиндра и в 2–3 раза превышает давление в неограниченном пространстве.

Уменьшение диаметра цилиндра приводит к росту давления во всем замкнутом объеме. Давления в канале разряда после прихода отраженных от поверхности волн увеличивается в 1,5–1,7 раза, давление жидкости, примыкающей к каналу, возрастает в 1,5–2 (при  $z = 0$ ) раза, а давление на стенку цилиндра в плоскости срединного сечения канала – в 1,7 раза.

Сказанное выше иллюстрируют рис. 3 и 4, где номером 1 отмечена зависимость давления от времени в неограниченной области, 2 – в цилиндре диаметра 0,07 м, 3 – в цилиндре диаметра 0,045 м.

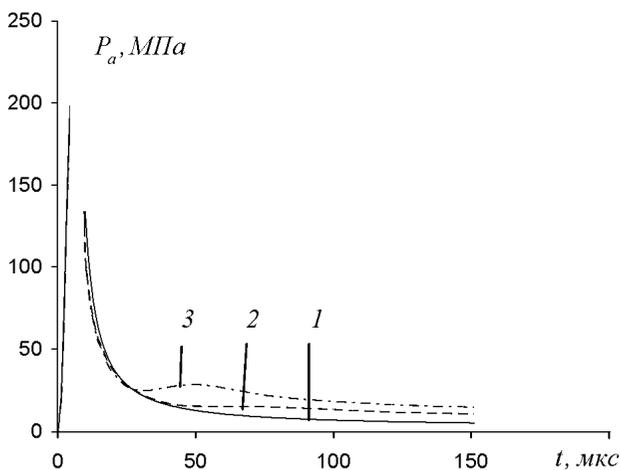


Рисунок 3 – Давление в канале разряда

В том случае, когда учитывается энергия, выделяющаяся при сгорании алюминиевой пудры, энергия, вводимая в канал разряда, возрастает в 2,4 раза. Крутизна нарастания мощности, которая, как известно [1], является основной величиной, определяющей состояние вещества в канале разряда, также увеличивается в 2,4 раза. Амплитуда давления в канале разряда и жидкости в замкнутом объеме возрастает в 1,6–1,8 раз. Величина давления в канале и в прилегающей к нему жидкости равно или превосходит давление, необходимое для экзотермической реакции окисления алюминиевого порошка в течение всего рассматриваемого периода времени.

Результаты расчетов в замкнутом объеме диаметра 0,07 м при учете только электрической энергии и энергии суммарной приведены на рис. 5 и 6. Здесь номером 1 обозначена зависимость давления от времени при учете только электрической энергии, 2 – при вводе суммарной энергии.

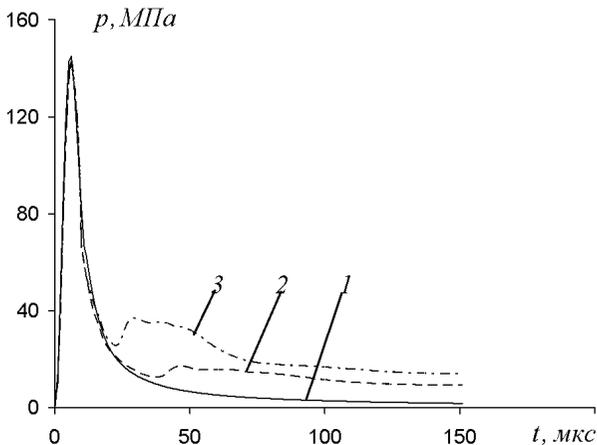


Рисунок 4 – Давление жидкости у стенки канала при  $z = 0$

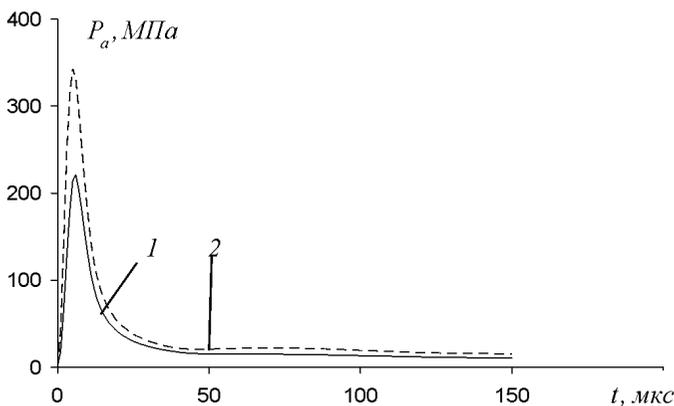


Рисунок 5 – Давление в канале разряда

#### 4 Выводы

В заполненной водой цилиндрической разрядной камере, длина которой равна 0,3 м, а диаметр – 0,07 м или 0,045 м, при электрическом разряде давление в канале и окружающей его жидкости после прихода к каналу разряда отраженных от поверхности цилиндра волн в 2–3 раза превышает аналогичные характеристики в неограниченном объеме.

В случае ввода в разрядный канал электрической энергии и энергии, получаемой при сгорании алюминиевой пудры, давление в рассмотренных разрядных камерах превышает 22,5 МПа. Это создает благоприятные условия для начала самоподдерживающейся экзотермической реакции горения порошка алюминия.

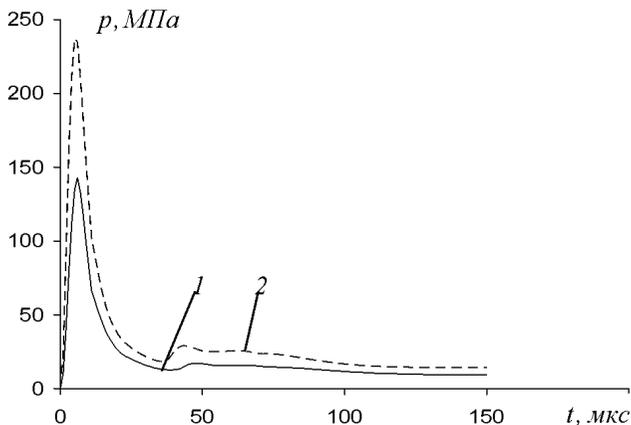


Рисунок 6 – Давление жидкости у стенки канала при  $z = 0$

**Список литературы:** 1. *Вовченко А.И., Посохов А.А.* Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. – К: Наукова думка, 1992. – 168 с. 2. *Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С.* Горение порошкообразных металлов в активных средах. – М.: Наука, 1972. – 294 с. 3. *Рытов С.А.* Эффективность применения электроразрядных технологий для устройства геотехнических конструкций // Жилищное строительство. – 2010. – № 5. – С. 47-50. 4. *Ризун А.Р., Поздеев В.А., Голень Ю.В.* Одноразовые электродные системы при высоковольтном электрическом разрушении природных и искусственных негабаритов // ЭОМ. – 2010. – № 3. – С. 78-81. 5. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. *С.К.Годунова*. – М.: Наука, 1976. – 400 с. 6. *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971. – 155 с.

*Поступила в редколлегию 28.10.2013*

УДК 532:537

**Определение давления жидкости в замкнутом цилиндре при высоковольтном электрическом разряде / Г. А. Барбашова, А. И. Вовченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 31-37. – Бібліогр.: 6 назв.

За допомогою чисельних методів досліджено тиск в каналі розряду і рідині в циліндричному замкнутому об'ємі з товстими стінками під час високовольтного електричного розряду. Зроблено оцінку впливу енергії, що утворюється під час окислення алюмінієвої пудри, на величину тиску.

**Ключові слова:** канал розряду, електричний розряд, тиск.

The pressure in the discharge channel and the fluid in the cylindrical closed container with thick walls during a high-voltage electrical discharge is numerically explored. The impact of the energy generated during aluminum powder oxidization on the pressure value is estimated.

**Keywords:** discharge channel, electrical discharge, pressure.

**А. В. БОРЦОВ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент, НТУ «ХПИ»;  
**Е. И. КУЗНЕЦОВА**, инженер 1-й кат., НТУ «ХПИ»

## ГОЛОЛЕДНЫЕ НАГРУЗКИ НА ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Описано действие гололедных образований на воздушные линии электропередачи. Приведен пример аварийной ситуации в результате плохих погодных условий. Проанализированы система ведомственных автоматизированных метеопостов НЭК Укрэнерго и автоматизированная информационная система контроля гололедной нагрузки МЭС Юга РФ.

**Ключевые слова:** гололедная нагрузка, воздушная линия электропередачи, метеопост, класс безотказности, система плавки гололеда, погонная нагрузка, имитатор провода.

**Введение.** Надежная и безотказная работа энергосистемы обеспечивается рядом факторов, в том числе механической прочностью ее сооружений. Большую опасность для целостности воздушных линий электропередачи (ВЛ) представляют ветровые и гололедные нагрузки.

По классу безотказности ВЛ разделяют на [1] (см. табл. 1).

Таблица 1 – Характеристики классов безотказности

Название характеристики	Характеристики для классов безотказности			
	1 КБ	2 КБ	3 КБ	4 КБ
Напряжение линии, кВ	до 1	1-35	110-330	500-750
Расчетный период эксплуатации, лет	30	50	50	50
Коэффициент надежности по ответственности $\gamma_n$ для расчета строительных конструкций	0,95	1,0	1,0	1,05

Нагрузка гололедных образований характеризуется толщиной стенки и весом гололеда. На рис. 1 [1] представлена карта районирования территории Украины по гололедным образованиям. Из рис. 1 можно сделать вывод, что образование гололеда на ВЛ очень распространенное для Украины явление. Для примера рассмотрим аварийную ситуацию, которая наблюдалась в ноябре 2000 года [2]: обледенение привело к аварии 20931 линии электропередачи, было разрушено свыше 307 тыс. железобетонных опор, стали непригодными для дальнейшей эксплуатации свыше 3420 т. проводов, погонная нагрузка на провод достигала 15кг/п.м. Общий ущерб составил 100 млн. евро. Значительная масса гололеда образовалась в течении 10-12 часов, затем 4-5 дней наблюдалось незначительное нарастание гололеда. Под действием климатических явлений было разрушено 17 ВЛ напряжением 330-750 кВ: 214

опор, 127 пролетов проводов, 71 пролет грозозащитных тросов, 22 гирлянды изоляторов и 3 фундамента. Комиссия при Кабинете Министров Украины приводит следующие причины аварии:

1. несовершенство норм по расчету и проектированию опор ВЛ, несоответствие данных нормативных документов, регламентирующих климатические нагрузки на электросетевые конструкции реальным процессам, происходящим в атмосфере;
2. старение элементов конструкций, вследствие длительной эксплуатации и недостаток денежных средств на их реконструкцию;
3. неработоспособность систем плавления гололеда токами КЗ;
4. недостаток аварийных запасов конструкций.

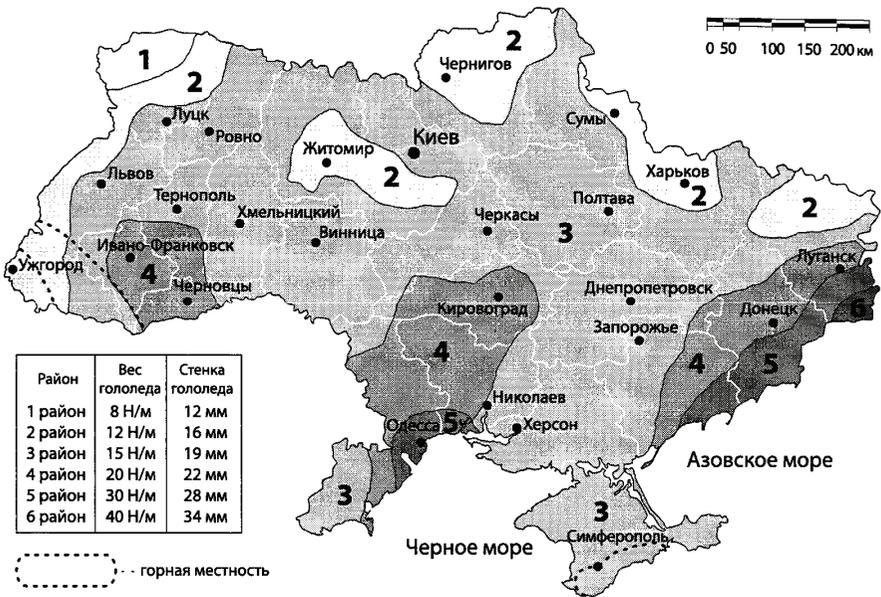


Рисунок 1 – Карта районирования территории Украины по характеристическим значениям гололеда

Для предотвращения подобных аварий вновь институтом «Укрэнерго-сетьпроект» совместно с Донбасской национальной академией архитектуры была доработана методика анализа климатических данных для определения нагрузок на воздушные линии электропередачи [3]. С целью получения более полной информации по метеорологической ситуации в местах прохождения ВЛ на 330-750 кВ в институте «Укрэнерго-сетьпроект» был разработан проект сети ведомственных автоматизированных метеопостов (СВАМ) НЭК Укр-энерго.

Целью данного проекта являлось [4]:

1. осуществление в автоматическом режиме непрерывного мониторинга метеобстановки на объектах;
2. оперативное получение текущей информации с места проявления метеоявления (либо его краткосрочный прогноз), для принятия производственными эксплуатационными службами электрических сетей предупредительных мер безопасности на объектах и обеспечение быстрого устранения в случае аварийного развития метеоситуации;
3. получение объективной, неискаженной вторичными преобразованиями, климатической ситуации для принятия решений по усилению конструкции существующих объектов, либо для разработки технических мер по предупреждению аварий климатического характера;
4. создание базы начальных данных для разработки конструкций электросетевых объектов, владеющих гарантированным уровнем надежности, стойкости, живучести и долговечности при рациональном вложении инвестиций;
5. накопление статистических данных по климату в условиях его постепенных изменений для дальнейшей корректировки или изменения нормативно-технической документации по расчету прочности конструкций ВЛ и подстанций.

На рис.2 приведена схема модуля метеопоста.

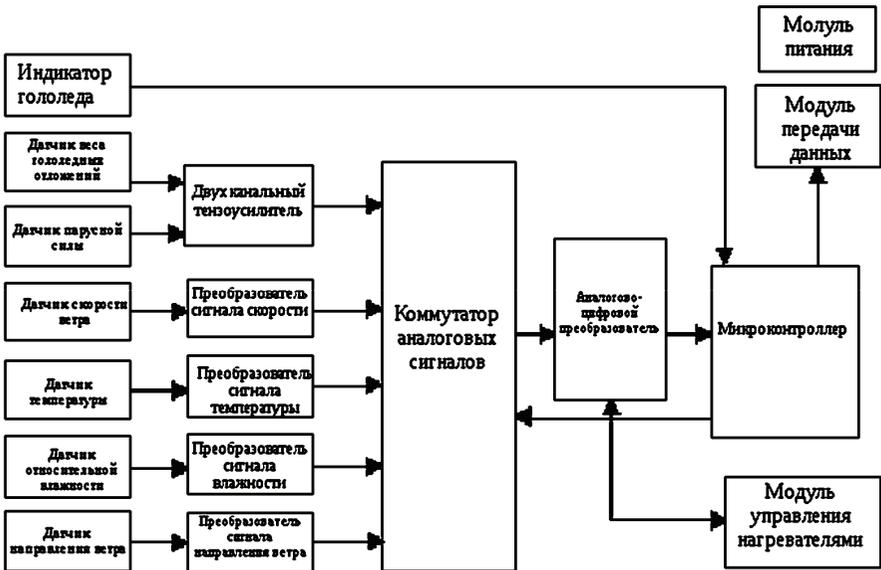


Рисунок 2 – Структурная схема измерительно-преобразовательного модуля метеопоста

Для контроля метеопараметров планировалось использоваться автоматизированные метеопосты, оснащенные датчиками температуры, влажности,

скорости и направления ветра, а также имитаторами проводов для измерения веса гололедных образований и парусности.

Проблема эксплуатации ВЛ в условиях интенсивных гололедно-ветровых воздействий характерна не только для территории Украины, например, некоторые районы Российской Федерации [5]. ВЛ электропередачи МЭС Юга расположенные на территориях 11 субъектов РФ в регионе Северного Кавказа подвержены воздействию гололедно-ветровых явлений в осени, зимний, и весенний периоды. Наиболее часто воздействию гололедных нагрузок подвергаются ВЛ, трассы которых проходят в предгорьях Главного Кавказского хребта, по территориям Ставропольского края – в Республике Калмыкия и Ростовской области. В 2004 г. в МЭС Юга была внедрена первая очередь автоматизированной информационной системы контроля гололедной нагрузки (АИСКГН). АИСКГН обеспечивает непрерывный контроль гололедной нагрузки и температуры воздуха. На рис. 3 представлена схема радиотелемеханической системы телеизмерения.

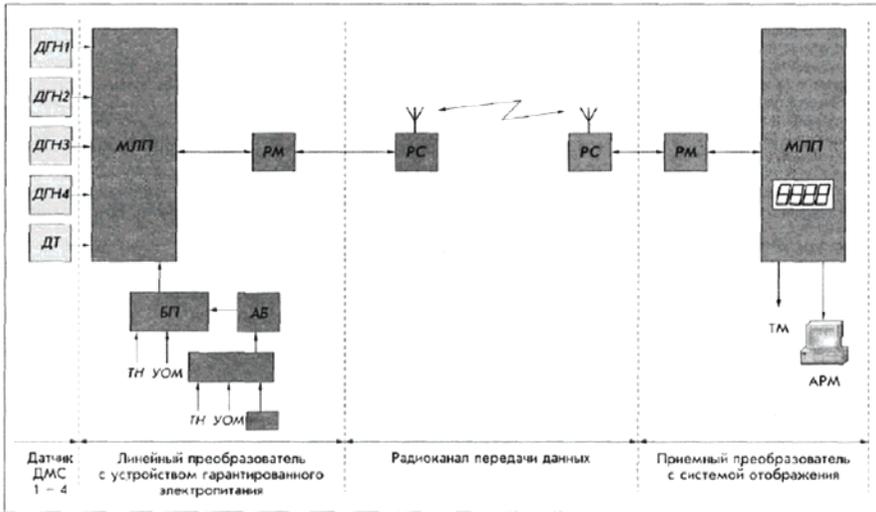


Рисунок 3 – Функциональная схема радиотелемеханической системы телеизмерения гололедных нагрузок (СГТН): ДГН – датчик гололедной нагрузки; ДТ – датчик температуры; МЛП – микропроцессорный линейный преобразователь; МПП – микропроцессорный приемный преобразователь; РМ – радиомодем; РС – радиостанция; ТМ – телемодем; БП – блок питания; АБ – аккумуляторная батарея; УОМ – устройство отбора мощности; ТН – трансформатор напряжения; АРМ – автоматизированное рабочее место

В АИСКГН используются бесконтактные датчики гололедной нагрузки, с диапазоном нагрузок от 0 до 100 кН (0-10000 кгс), датчики температуры для диапазона от -40 до +40 °С. В качестве источника питания используется фо-

тоэлектрические панели.

Основным недостатком проекта СВММ НЕК Укрэнерго является проблема энергоснабжения метеопоста на линиях электропередачи 330 – 750 кВ.

Недостатками автоматизированной информационной системы контроля гололедной нагрузки является то, что:

- измерения проводятся только по двум метеопараметрам – нагрузка гололеда и температура;
- не измеряется скорость и направление ветра, влажность окружающего воздуха.

Перспективным представляется использование автоматизированной информационной системы контроля гололедной нагрузки и системы автономного питания, содержащей фотоэлектрическую панель, ветроустановку и трансформаторный источник питания от высоковольтной линии.

### **Выводы**

1. Гололедные нагрузки на ВЛ являются весомой проблемой для Украины
2. Для СВММ НЭЕ Укрэнерго необходимо обеспечение питанием на ВЛ.
3. Для питания автоматизированных информационных систем контроля предлагается использовать энергетический комплекс, включающий энергию солнца, ветра и энергию, передаваемую по ВЛ.

**Список литературы:** 1. Правила устройства электроустановок. Раздел 2. Глава 2.5. Воздушные линии электропередачи выше 1 кВ до 750кВ. – Х.: Форт, 2009. – С. 249-253. 2. *Горохов С. В.* Вітрові та ожередові впливи на повітряні лінії електропередачі / *С.В. Горохов, М.І.Казакевич, С.В.Турбін, Я.В.Назін* та ін. – Д.: 2005. – С. 26–33. 3. *Нейман В.А.* Климатические данные для определения нагрузок на ВЛ по локальным территориям Украины / *В.А.Нейман* // Электрические сети и системы. – К.: 2009. – № 4. – С. 33–35. 4. *Потовська К.І.* Використання відновлюваних джерел енергії для живлення автоматизованого метеопосту на лінії електропередач / *К.І.Потовська* // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Х.: 2008. – №6. – С. 37–44. 5. *Дьяков Ф. А.* Эксплуатация ВЛ 330-500 кВ в условиях интенсивных гололедно-ветровых воздействий. Внедрение системы автоматического наблюдения за гололедом / *Ф. А. Дьяков* // Энергетик. – М.: 2005. – №6. – С. 20–25.

*Поступила в редколлегию 03.09.2013*

УДК 620.9

**Гололедные нагрузки на воздушные линии электропередач / А. В. Борцов, Е. И. Кузнецова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 38-43. – Бібліогр.: 6 назв.

Описано дію ожеледових утворень на повітряні лінії електропередачі. Наведено приклад аварійної ситуації в результаті поганих погодних умов. Проаналізовані система відомчих автоматизованих метеопостів НЕК Укрэнерго та автоматизована інформаційна система контролю ожеледового навантаження МЕС Півдня РФ.

**Ключові слова:** ожеледове навантаження, повітряна лінія електропередачі, метеопост, клас безвідмовності, система плавки ожеледі, подовжинне навантаження, імітатор дроту.

The effect of formation of glaze on the overhead transmission lines has been described. An example of an emergency situation as a result of bad weather conditions has been given. The system of departmental automated weather station NEC Ukrenergo and automated information system for monitoring ice load MEN South RF have been analyzed.

**Keywords:** ice load, overhead transmission line, weather station, reliability class, ice melting system, linear load, wire simulator.

УДК 621.317.3

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

**В. В. КНЯЗЕВ**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;

**Г. М. КОЛИУШКО**, канд. техн. наук, зам. директора, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭФФЕКТОВ МОЛНИИ НА ОБОРУДОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ**

Рассмотрены примеры использования двух разработанных методов для определения каналов растекания тока молнии по гальваническим связям на типовых объектах. Доказана эффективность использования этих методов при прогнозировании параметров электромагнитных помех, поступающих на входы аппаратуры, при вероятных ударах молнии в элементы объекта.

**Ключевые слова:** молния, молниеприемник, заземляющее устройство, гальваническая связь, уровень стойкости.

### **Введение**

Проблема защиты объектов от молниевых разрядов существенно изменила акценты. Если ранее главной задачей было обеспечить пожарную безопасность объекта, то сегодня, наряду с этой задачей требуется обеспечить надежное функционирование оборудования, расположенного на объекте. Поскольку, зачастую, повреждение оборудования может привести к катастрофическим последствиям. Анализ состояния систем молниезащиты однозначно показывает, что второй аспект проблемы – защита оборудования, как правило, не учитывается проектантами.

Основные негативные последствия удара молнии в объект связаны с протеканием больших импульсных токов. Для оценки возможных деструктивных явлений важно знать по каким гальваническим связям и в какой пропорции будет происходить протекание тока молнии, при ударе в то, или иное

© О. Ю. Глебов, В. В. Князев, Г. М. Колиушко, 2013

место на объекте. Такая информация может быть получена только экспериментальным путем. На сегодняшний день, нет стандартизованного на международном уровне метода, который позволяет решать такую задачу.

НДПКІ «Молния» НТУ «ХПІ» за последние 20 лет выполнены работы по диагностике состояния устройств заземления и систем молниезащиты более чем на 900 объектах электроэнергетики Украины. По результатам этих исследований институтом разработан отраслевой стандарт Украины СОУ 31.2-21677681-19: 2009 [1], а среднестатистические параметры электромагнитных процессов, которые сопровождают молнию, обобщены в межгосударственном стандарте ГОСТ 30585-98 [2].

Накопленный опыт позволил предложить и опробовать на практике экспериментальные методы определения каналов растекания тока молнии с последующей экстраполяцией результатов на значения натурной молнии. Реализовано два основных метода, отличающихся видом подаваемого тестового сигнала и регистрируемыми параметрами. Первый вариант реализуется подачей импульсного сигнала с временными параметрами, характерными для среднестатистической молнии, в точку вероятного удара молнии. При этом, с помощью осциллографа регистрируется сигнал, наведенный на элементах проводной связи по отношению к «земле». Второй вариант основан на подаче сигналов определенных частот, набор которых подбирается из спектрального состава рассматриваемой молнии. В этом варианте с помощью резонансно настроенного индукционного преобразователя измеряется уровень силы тока в каждом из элементов проводных связей. По результатам измерений строится схема растекания тока с указанием доли интегрального тока, протекающего по элементу. Упомянутые выше методы гармонично дополняют друг друга. В совокупности, они обеспечивают возможность получения достаточно полной информации для осуществления достоверного прогноза относительно параметров напряжений и токов, которые будут вызваны ударом молнии в тот или иной конструктивный элемент объекта.

**Целью** настоящей работы является доказательство эффективности разработанных методов определения каналов растекания тока молнии на объекте.

### **Материалы и результаты исследования**

В качестве объекта для исследований выбрана типовая радиовышка, аналоги которой устанавливаются вблизи высоковольтных подстанций (ПС) с открытыми распределительными устройствами (ОРУ) классов напряжения 35 кВ и выше, газораспределительных, нефтеперекачивающих и других подобных объектах. Оборудование связи находится, как правило, в одном из помещений общестанционного пункта управления (ОПУ) или главного щита управления (ГЩУ). В качестве примера, на рис. 1 представлена фотография радиовышки с типичной прокладкой кабелей. Покажем, как наличие подобной радиовышки может создать опасность для всего комплекса оборудова-

ния, расположенного на объекте.

На одной из обследованных электрических подстанций были установлены следующие недостатки (типичные для таких объектов):

1. Заземляющее устройство узла связи имело только одну специальную шину связи с заземляющим устройством (ЗУ) подстанции, что противоречит п.1.7.71 ПУЭ.

2. Молниеотвод не выполнял свою функцию, поскольку был ниже радиовышки примерно вдвое и фактически находится в зоне ее защиты.



Рисунок 1 – Мачта связи на территории ЛПУ магистральных газопроводов

Поэтому, была рассмотрена ситуация, когда молния ударяет именно в радиовышку. Сопротивление контура ЗУ подстанции, по результатам измерений, не превышало 0,15 Ом. Измерение суммарного сопротивления между внутренней заземляющей шиной узла связи и контуром ЗУ (то есть по проводам связи и оболочкам кабелей) дало значение: 0,036 Ом.

Дальнейшие исследования были проведены с помощью генератора синусоидальных токов ГСТ-3 и измерителя напряженности магнитного поля ИЭМП-200/400. Потенциальная клемма генератора подсоединялась к радиовышке, а нулевая – к контуру ЗУ на ближайшем портале. Сопротивление связи мачты с контуром ЗУ составило 0,148 Ом. Путиами растекания тока являлись:

- а) вертикальные заземлители радиовышки;
- б) заземляющие провода, проходящие транзитом через узел связи (УС);
- в) оплетки кабелей, проходящие через аппаратуру узла связи и ГЩУ.

Измерения показали следующую пропорцию растекания тока по обозначенным выше путям:

$$a : б : в = 2 : 67 : 31.$$

Таким образом, в случае удара молнии в радиовышку, практически весь ток молнии пройдет через заземляющие провода и аппаратуру УС и ГЩУ.

Еще один пример. Базовая станция сотовой связи установлена в здании автоматической телефонной станции. На расстоянии 15 м установлена радиовышка высотой 70 м. В течение одного года произошло два удара молнии в радиовышку. В результате было повреждено оборудование базовой станции, несколько компьютеров и устройств связи в здании автоматической телефонной станции, а также оборудования в соседнем здании.

Обследование с помощью резонансного метода показало следующую количественную картину растекания тока при разряде молнии в радиовышку: 20 % тока молнии отводятся в грунт непосредственно через фундамент основания радиовышки, а 80 % тока молнии протекают по кабелям антенн в пределы аппаратных БС и далее выносятся по нулевому рабочему проводнику силового фидера на главный распределительный щит (ГРЩ) АТС. Из ГРЩ 70% тока выносятся по нулевым рабочим проводникам вводных фидеров в ТП и отводятся в грунт через заземлитель ТП. Остальные 10 % тока молнии протекают по нулевым рабочим проводникам в КРОСС, аппаратную АТС, стекают по заземляющему проводнику аппаратной и отводятся в грунт через заземлитель АТС.

Отметим, что развитие сотовой связи в настоящее время происходит, в основном, путем оборудования станций на существующих объектах различного назначения (промышленные предприятия, АТС, жилые и общественные здания) с установкой антенн непосредственно на зданиях или вблизи них. При этом, как показывают приведенные выше примеры, существенным образом нарушается принятая система мер защиты от опасных грозových воздействий:

1. При установке антенных мачт, башен и опор значительно (в некоторых случаях более, чем на порядок) возрастает вероятность поражения молнией объекта.

2. Наличие кабелей связи антенн со станцией создает прямой путь прохождения тока молнии внутрь здания или сооружения. При размещении станции вблизи объекта в контейнере создается путь для тока молнии через систему электроснабжения, так как станция питается от общей системы электроснабжения объекта или непосредственно от ТП.

Таким образом, при оборудовании станций сотовой связи создаются предпосылки для опасных воздействий на людей и оборудования в период грозового сезона, если не предпринимать специальных мер по организации

эффективной молниезащиты.

Рассмотрим примеры применения импульсного метода исследования.

Показательным в этом отношении является пример выполнения указанных выше работ на одной из ПС 330 кВ Северной ЭС НЭК "Укрэнерго". После проведения диагностики состояния ЗУ ПС проводились экспериментальные исследования по определению уровней помех в коаксиальных кабелях ВЧ связи, соединяющих антенны, находящиеся на радиовышке, и оборудование ВЧ связи, установленное в одном из помещений ОПУ. В результате диагностики состояния ЗУ радиовышки, а также визуального осмотра коаксиальных кабелей установлено, что:

– ЗУ радиовышки состоит из естественных заземлителей (фундаментов) и искусственных заземлителей, присоединенных к металлоконструкции радиовышки, и связано с ЗУ ПС только по экранирующим оболочкам коаксиальных кабелей;

– коаксиальные кабели проходят вдоль металлоконструкции радиовышки не в металлических трубах, а на участке между радиовышкой и ОПУ кабели подвязаны к металлическому тросу, который с одной стороны заземлен через металлоконструкцию радиовышки, а с другой стороны – не заземлен;

– по периметру помещения связи установлена шина уравнивания потенциалов, связанная с системой уравнивания потенциалов ОПУ, однако, в месте ввода в ОПУ экранирующие оболочки кабелей не присоединены к шине уравнивания потенциалов.

Для определения в коаксиальных кабелях напряжений помех выполнялась имитация удара молнии в радиовышку с помощью генератора аperiodических импульсов (ГАИ), который в режиме холостого хода генерирует импульс напряжения с параметрами волны 1,2/50 мкс и амплитудой 1000 В. При этом один полюс ГАИ подключался к металлоконструкции радиовышки, а другой – к токовому электроду, удаленному от радиовышки на 50 м. Значение импульсного тока  $I_{ИМП}$  измерялось встроенным в ГАИ измерителем амплитуды импульсного тока. Напряжение помех общего вида  $U_{ПОМ}$  (жила – заземленная экранирующая оболочка) определялось с помощью осциллографа Tektronix TDS 1012. Схема имитации удара молнии в радиовышку и определения уровней помех в коаксиальных кабелях показана на рис. 2.

Результаты измерений напряжений помех при имитации удара молнии в радиовышку приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерений напряжений помех

Объект	$I_{ИМП}$ , А	$U_{ПОМ}$ , В
кабель 1	31,0	5,56
кабель 2	31,0	5,80

По результатам диагностики состояния ЗУ радиовышки были разработаны рекомендации по его реконструкции, которые заключались в объединении ЗУ радиовышки и ЗУ ПС двумя горизонтальными заземлителями. После

выполнения ремонтно-восстановительных работ были повторно проведены измерения напряжений помех, результаты которых приведены в табл. 2, а осциллограммы – на рис. 3.

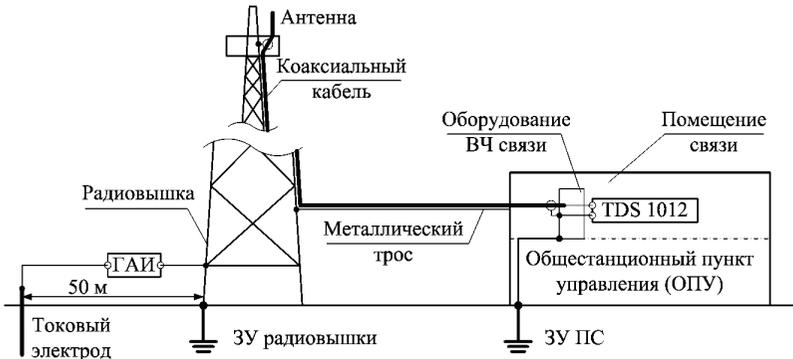


Рисунок 2 – Схема имитации удара молнии в радиовышку и определения уровней помех в коаксиальных кабелях

Таблица 2 – Результаты измерений напряжений помех после проведения ремонтно-восстановительных работ

Объект	$I_{ДМП}, А$	$U_{ПОМ}, В$
кабель 1	42,4	3,32
кабель 2	42,4	3,72

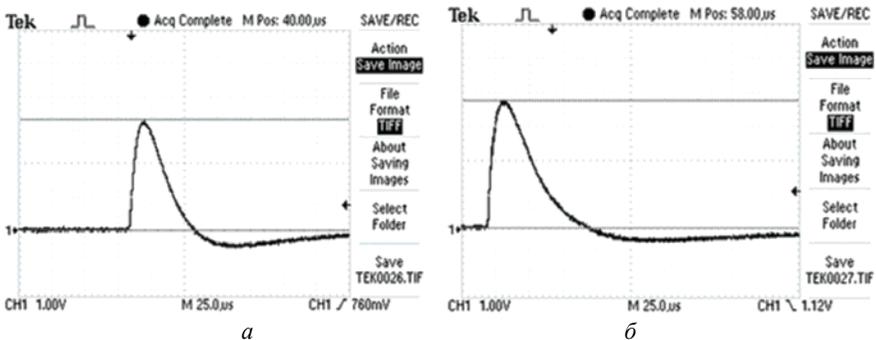


Рисунок 3 – Осциллограммы напряжений помех в кабелях после проведения ремонтно-восстановительных работ: а – кабель 1, б – кабель 2

Рассмотрим, какой эффект получен в результате ремонтных работ, для случая удара молнии. Для анализа влияния конструктивного выполнения ЗУ на уровень помех рассматривались указанные выше варианты присоединения ЗУ радиовышки к ЗУ ПС: вариант 1 – ЗУ радиовышки присоединено к ЗУ ПС только экранирующими оболочками коаксиальных кабелей; вариант 2 – ЗУ

радиовышки присоединено к ЗУ ПС двумя горизонтальными заземлителями, проложенными на глубине 0,5 м.

В табл. 3 приведены расчетные значения напряжений помех  $U_{РАСЧ}$  при амплитуде силы тока молнии  $I_{МОЛН} = 30$  кА для трех различных вариантов присоединения ЗУ радиовышки к ЗУ ПС, полученные путем пересчета измеренного напряжения к току молнии (1). Вероятность появления молний с силой тока превышающей 30 кА ( $\gamma_{МОЛН}$ ) составляет 50 % [3].

$$U_{РАСЧ} = U_{ПОМ} \frac{I_{МОЛН}}{I_{ИМП}}. \quad (1)$$

Таблица 3 – Результаты расчета напряжений помех

Объект испытания	Обозначение параметра	Значение параметров для различных вариантов присоединения ЗУ радиовышки к ЗУ ПС при $I_{МОЛН} = 30$ кА	
		Вариант 1	Вариант 2
Кабель 1	$U_{РАСЧ}$ , кВ	5,37	2,34
Кабель 2	$U_{РАСЧ}$ , кВ	5,61	2,64

Анализ полученных результатов расчета напряжений помех показывает, что для варианта 2 значение напряжения помех снизилось по сравнению с вариантом 1 на 56 % для кабеля 1 и на 53 % для кабеля 2.

Метод позволяет оценить вероятность появления молнии, сила тока которой превысит заданный уровень защиты входных портов. Для этого нужно воспользоваться формулой (2).

$$I_{МОЛН} = I_{ИМП} \frac{U_{ДОП}}{U_{ПОМ}} = I_{ИМП} \frac{2 \cdot 10^3}{U_{ПОМ}}. \quad (2)$$

В табл. 4 приведены результаты расчета силы тока молнии  $I_{МОЛН}$ , при котором возникают недопустимые напряжения помех (более 2 кВ), способных нарушить нормальное функционирование оборудование связи:

Таблица 4 – Результаты расчета силы тока молнии, при котором возникают недопустимые напряжения помех

Объект испытания	Обозначение параметра	Значение параметров для различных вариантов присоединения ЗУ радиовышки к ЗУ ПС при $U_{ДОП} = 2$ кВ	
		Вариант 1	Вариант 2
Кабель 1	$I_{МОЛН}$ , кА	11,15	25,54
	$\gamma_{МОЛН}$ , %	90	68,5
Кабель 2	$I_{МОЛН}$ , кА	10,69	22,8
	$\gamma_{МОЛН}$ , %	90,5	73

Анализ результатов расчета тока молнии, при котором возникают недопустимые напряжения помех, показывает:

– для варианта 1: Для кабеля 1 амплитуда тока молнии более 11,15 кА, а для кабеля 2 – более 10,69 кА. При этом вероятность появления таких молний составит 90 % и 90,5 % соответственно;

– для варианта 2: Для кабеля 1 амплитуда тока молнии более 25,54 кА, а для кабеля 2 – более 22,8 кА. При этом вероятность появления таких молний составит 68,5 % и 73 % соответственно.

## **Выводы**

1. Экспериментально доказано ефективність розроблених методів визначення каналів растекания тока молнии. Представлены результаты практического использования методов на стратегических объектах Украины.

2. Импульсный метод позволяет определить вероятность появления электромагнитных помех, уровень которых превышает заданный уровень устойчивости входных портов оборудования.

3. Резонансный метод позволяет определить долю тока молнии, которая будет протекать по тому или иному элементу гальванических связей объекта при ударе молнии в указанную точку.

4. Совокупность результатов, полученных этими методами, позволяет определить слабые места на объекте с точки зрения уровня устойчивости к действию факторов, сопровождающих молниевый разряд, и разработать рекомендации по повышению уровня устойчивости, в случае необходимости.

Результаты получены в рамках научно-исследовательской работы (ГР №0212U005986), которая выполняется по заказу Министерства образования и науки Украины в 2013-2014 годах.

**Список литературы:** 1. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція: СОУ 31.2-21677681-19:2009. – Офіц. вид. – К.: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2009. – 64 с. (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Інструкція). 2. СТЭС. Стійкість до дії грозивих розрядів. Технічні вимоги та методи випробувань: ДСТУ 3681-98 (ГОСТ 30585-98) – [Чинний від 1999-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 1999. – 28 с. – (Міждержавний стандарт). 3. IEC 62305-1-10 Protection against lightning. – Part 1: General principles.

*Поступила в редколлегию 25.10.2013*

УДК 621.317.3

**Определение степени влияния электромагнитных эффектов молнии на оборудование объектов энергетики / О. Ю. Глебов, В. В. Князев, Г. М. Колиушко // Вісник НТУ «ХП».** Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 60 (1033). – С. 43-51. – Бібліогр.: 6 назв.

Розглянуто приклади використання двох розроблених методів для визначення каналів розтікання струму блискавки по гальванічних зв'язках на типових об'єктах. Доведена ефективність використання цих методів при прогнозуванні параметрів електромагнітних завад, що поступають на входи апаратури, при вірогідних ударах блискавки в елементи об'єкту.

**Ключові слова:** блискавка, блискавоприймач, заземлюючий пристрій, гальванічний зв'язок, рівень стійкості.

The examples of the use of two worked out methods are considered for determination of channels of spreading of current of lightning on galvanic connections on model objects. Well-proven efficiency using of these methods for prognostication of parameters of the electromagnetic noise acting on the entrances of apparatus, at the credible shots of lightning in the elements of object.

**Keywords:** lightning, air terminal, grounding device, galvanic connection, level of immunity.

УДК 621.316.9

**О. Ю. ГЛЕБОВ**, ст. науч. сотр., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;  
**Д. Г. КОЛИУШКО**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НИПКИ «Молния»  
НТУ «ХПИ»;

**Г. М. КОЛИУШКО**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зам. директора,  
НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;

**А. В. ПЛИЧКО**, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

## **ЗАЗЕМЛЕНИЕ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ПОДСТАНЦИЯХ 330/110 КВ**

В статье приведены основные недостатки заземляющих устройств подстанций 330/110 кВ в части заземления устройств защиты от перенапряжений. Рассмотрено несколько примеров заземляющих устройств подстанций 330/110 кВ, расположенных в различных регионах Украины.

**Ключевые слова:** заземляющее устройство, устройства защиты от перенапряжений, подстанции высокого напряжения.

Внутренние и грозовые перенапряжения входят в ряд основных дестабилизирующих факторов на электроэнергетических объектах, оказывающих существенное влияние на электробезопасность, надежность и эффективность функционирования оборудования этих объектов. Для защиты от указанных воздействий используют специальные устройства (устройства защиты от перенапряжений – УЗП) – разрядники различного типа, нелинейные резисторы – варисторы и др., принцип работы которых основан на значительном уменьшении их сопротивления (то есть уравнивание потенциалов путем замыкания токоведущих частей на землю), что приводит к протеканию больших импульсных токов через УЗП, а, следовательно – и к возникновению значительных напряжений на заземляющем устройстве (ЗУ). Таким образом, для обеспечения надежности и эффективности работы УЗП необходимо выполнить для них ЗУ, обеспечивающее низкое значение цепи разряда. Кроме того, данное ЗУ необходимо выполнить с учетом требований электромагнит-

© О. Ю. Глебов, Д. Г. Колиушко, Г. М. Колиушко, А. В. Пличко, 2013

ной совместимости с вторичными цепями электроэнергетических объектов.

ЗУ является неотъемлемой частью электроустановки, обеспечивающее в аварийных режимах электробезопасность и надежность функционирования энергообъекта [1]. Поэтому оценка состояния ЗУ является актуальной задачей.

С целью контроля состояния ЗУ сотрудниками НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» и ГП «ДонОРГРЭС» в 2003 году был разработан нормативный документ ГНД 32.20.303 «Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція» [2], который в 2009 году был пересмотрен, дополнен и выпущен как СОУ 31.2-21677681-19:2009 «Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція» [3].

Для проведения электромагнитной диагностики состояния ЗУ сотрудниками НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» разработали измерительный комплекс КДЗ–1У, который введен в Реестр измерительной техники, допущенной к применению в Украине.

На сегодняшний день по указанной методике с использованием разработанного комплекса оборудования сотрудниками НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» совместно с ООО НПП «Каскад» обследовано более 1000 объектов. Среди них все четыре ныне действующие атомные электростанции, около двух десятков тепловых электростанций, три гидроэлектростанции Днепровского каскада, около 800 подстанций классов напряжений 35–750 кВ, газокомпрессорные и нефтеперекачивающие станции, установки связи, а также здания и сооружения промышленного и иного назначения.

Анализ результатов диагностики ЗУ, полученных за последние шестнадцать лет, позволяет утверждать, что ЗУ практически всех объектов на момент обследования не удовлетворяли требованиям ПУЭ как по конструктивному выполнению, так и по значениям контролируемых параметров.

Основными недостатками с точки зрения заземления УЗП можно считать следующие.

1. УЗП присоединено к ЗУ не отдельным проводником (т.е. включено последовательно с другим оборудованием подстанции), что является нарушением требований п.1.7.159 ПУЭ:2006. В случае срабатывания УЗП это приведет к возникновению высокого напряжения на конструкции того оборудования, последовательно с которым УЗП включено в ЗУ.

2. УЗП присоединено к ЗУ длинным проводником (10 м и более), хотя согласно требований п.1.7.106 ПУЭ:2006 максимальная длина заземляющего проводника не должна превышать 1,5 м, а согласно п.1.7.107 ПУЭ:2006 необходимо обеспечивать как можно меньшую длину заземляющего проводника. Этот недостаток приводит к снижению эффективности работы УЗП вследствие увеличения полного сопротивления цепи разряда.

3. УЗП присоединено к группе оборудования, которое связано между собой горизонтальными заземлителями, но связи с ЗУ подстанции не имеет, что является нарушением требований п.1.7.66 и п.1.7.77 ПУЭ:2006. Этот недостаток также приводит к снижению эффективности работы УЗП, так как в

аварийных ситуациях потенциал обособленного заземлителя группы оборудования будет очень существенно отличаться от потенциала ЗУ подстанции.

4. УЗП присоединено к ЗУ на значительном расстоянии (по длине горизонтального заземлителя) от защищаемого оборудования, например, силового трансформатора или автотрансформатора. Этот недостаток также приводит к снижению эффективности работы УЗП, так как потенциал точки заземления нейтрали трансформатора или автотрансформатора будет существенно отличаться от потенциала точки заземления УЗП.

5. УЗП установлены вдоль (вблизи) кабельного канала и их заземляющие проводники присоединены к металлоконструкции канала, что в случае срабатывания УЗП приведет к электрическому пробую изоляции кабелей вторичных цепей.

На большинстве обследованных подстанций 330/110 кВ имеет место хотя бы один из указанных недостатков, а иногда и их сочетание.

Для иллюстрации указанных недостатков ниже на рисунках приведены примеры заземляющих устройств подстанций, расположенных в различных частях Украины.

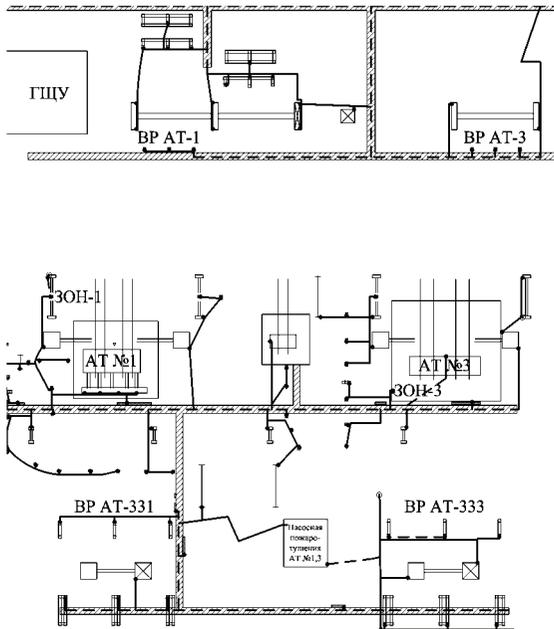


Рисунок 1 – Фрагмент плана подстанции 330/150 кВ

На рис. 1 изображен фрагмент плана подстанции 330/150 кВ, расположенной в центральной части Украины. В верхней части рисунка расположены разрядники 150 кВ (ВР АТ-1 и ВР АТ-3), предназначенные для защиты

автотрансформаторов АТ № 1 и АТ № 3 на стороне 150 кВ. Указанные УЗП присоединены только к металлоконструкции кабельного канала, вдоль которого они установлены.

В средней части рисунка расположено собственно защищаемое оборудование – автотрансформаторы АТ № 1 и АТ № 3, а также их заземлители нейтрали ЗОН-1 и ЗОН-3 соответственно.

В нижней части рисунка расположены разрядники 330 кВ (ВР АТ-331 и ВР АТ-333), предназначенные для защиты АТ № 1 и АТ № 3 на стороне 330 кВ. ВР АТ-331 также присоединены только к металлоконструкции кабельного канала. Следует заметить, что точки заземления нейтралей автотрансформаторов (ЗОН-1 и ЗОН-3) настолько удалены (по заземлителям) от точек заземления разрядников, что эти связи даже не попали на данный фрагмент подстанции размером 80×90 м.

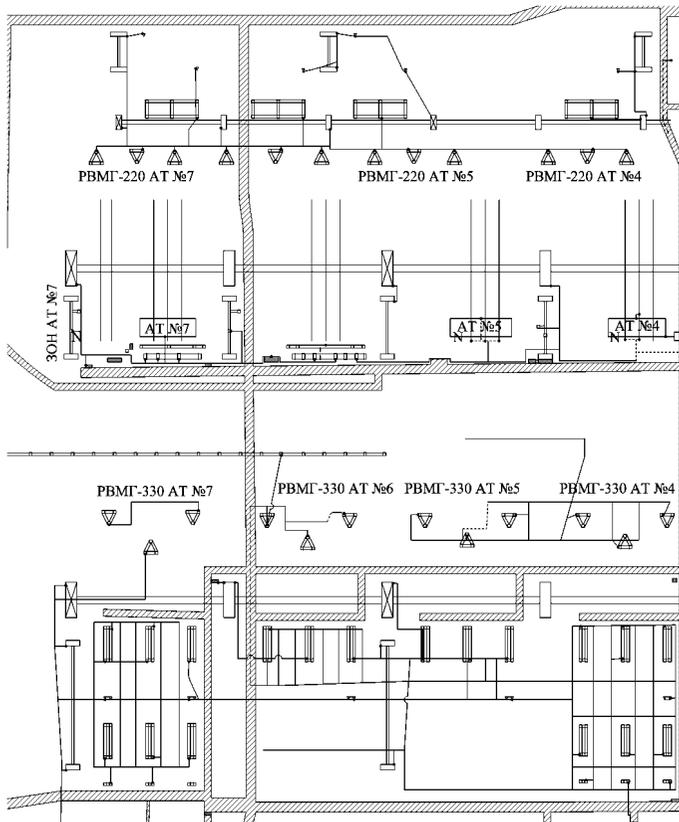


Рисунок 2 – Фрагмент плана подстанции 330/220/110 кВ

На рис. 2 изображен фрагмент плана подстанции 330/220/110 кВ, расположенной в восточной части Украины. В верхней части рисунка расположены разрядники 220 кВ (РВМГ-220 АТ № 7, РВМГ-220 АТ № 5 и РВМГ-220 АТ № 4), предназначенные для защиты АТ № 7, АТ № 5 и АТ № 4 на стороне 220 кВ. Указанные УЗП присоединены короткими заземляющими проводниками к магистрали заземления, но сама магистраль соединена с ЗУ подстанции последовательно через металлоконструкцию портала.

В средней части рисунка расположены автотрансформаторы АТ № 7, АТ № 5 и АТ № 4, а также заземлитель нейтрали ЗОН АТ № 7 и точки (N) заземления нейтралей АТ № 5 и АТ № 4, расположенные на металлоконструкции баков соответствующих автотрансформаторов.

В нижней части рисунка расположены разрядники 330 кВ (РВМГ-330 АТ № 7, РВМГ-330 АТ № 6, РВМГ-330 АТ № 5 и РВМГ-330 АТ № 4), предназначенные для защиты АТ № 7, (АТ № 6 демонтирован для кап. ремонта), АТ № 5 и АТ № 4 на стороне 330 кВ. Имеет место две группы оборудования, не присоединенного к ЗУ подстанции: две фазы разрядника РВМГ-330 АТ № 7; все фазы разрядников РВМГ-330 АТ № 5 и РВМГ-330 АТ № 4. Одна фаза разрядника РВМГ-330 АТ № 7 присоединена к ЗУ подстанции заземляющим проводником длиной около 20 м. РВМГ-330 АТ № 6 присоединены к металлоконструкции кабельного канала.

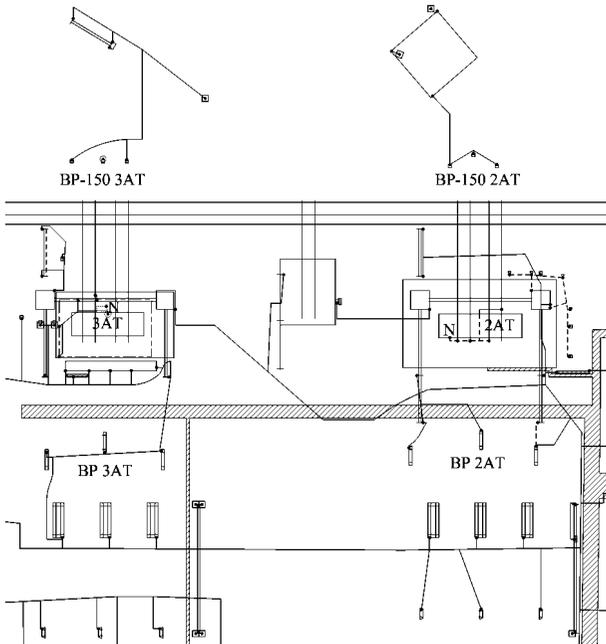


Рисунок 3 – Фрагмент плана подстанции 330/150 кВ

Также как и в предыдущем примере, точки заземления нейтралей автотрансформаторов настолько удалены (по заземлителям) от точек заземления разрядников, что эти связи даже не попали на данный фрагмент подстанции размером 100×110 м.

На рис. 3 изображен фрагмент плана подстанции 330/150 кВ, расположенной в южной части Украины. В верхней части рисунка расположены разрядники 150 кВ (ВР-150 3АТ и ВР-150 2АТ), предназначенные для защиты 3АТ и 2АТ на стороне 150 кВ. Указанные УЗП образуют две группы оборудования, не присоединенного к ЗУ подстанции.

В средней части рисунка расположены автотрансформаторы 3АТ и 2АТ, а также точки (N) заземления нейтралей 3АТ и 2АТ, расположенные на металлоконструкции баков соответствующих автотрансформаторов. Нейтрали 3АТ и 2АТ не присоединены отдельными ответвлениями к ЗУ подстанции.

В нижней части рисунка расположены разрядники 330 кВ (ВР 3АТ и ВР 2АТ), предназначенные для защиты 3АТ и 2АТ на стороне 330 кВ. Разрядника ВР 2АТ присоединены к ЗУ подстанции заземляющими проводниками длиной от 5 до 10 м.

### **Выводы**

1. Необходимо выполнить работы по электромагнитной диагностике состояния ЗУ для всех энергообъектов и составить паспорта на ЗУ с исполнительными схемами.

2. Во время строительства и реконструкции подстанций осуществлять контроль проведения монтажа ЗУ. Акт скрытых работ оформлять после полной проверки ЗУ на соответствие проектной документации. Особое внимание следует уделять местам заземления УЗП и нейтралей трансформаторов и автотрансформаторов.

3. Для определения напряжения на ЗУ при срабатывании УЗП, установленных вблизи кабельных каналов, целесообразно выполнять измерение сопротивления заземлителя УЗП импульсному току нормированной амплитуды и формы (например, 8/20 мкс).

**Список литературы:** 1. Кац Е. Л., Меньшов Б. Г., Целебровский Ю. В. Заземляющие устройства электроустановок высокого и низкого напряжений. Сер. «Электрические станции и сети» (Итоги науки и техники). – М., ВИНТИ, 1989. 2. ГНД 32.20.303 «Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція». ОЕП «ГРІФРЕ». – К.: 2010. 3. СОУ 31.2-21677681-19:2009 «Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція». ОЕП «ГРІФРЕ». – К.: 2010.

*Поступила в редколлегию 10.10.2013*

УДК 621.316.9

**Заземление устройств защиты от перенапряжений на подстанциях 330/110 кВ / О. Ю. Глебов, Д. Г. Колиушко, Г. М. Колиушко, А. В. Пличко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 60 (1033). – С. 51-57. – Бібліогр.: 3 назв.**

В статті наведено основні недоліки заземлюючих пристроїв підстанцій 330/110 кВ в частині заземлення пристроїв захисту від перенапруг. Розглянуто декілька прикладів заземлюючих пристроїв підстанцій 330/110 кВ, розташованих в різних регіонах України.

**Ключові слова:** пристрій заземлення, пристрій захисту від перенапруг, підстанції високої напруги.

The main defects of grounding system for grounding of overvoltage protection devices are given in the paper. Also several examples of high voltage substations grounding system from different regions of Ukraine are considered in the paper.

**Key words:** grounding system, overvoltage protection devices, high voltage substations.

УДК 551.594.221

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

**П. Н. МЕЛЬНИКОВ**, науч. сотр., НТУ «ХПИ»;

**О. С. НЕДЗЕЛЬСКИЙ**, вед. инж., НТУ «ХПИ»;

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

**С. С. РУДЕНКО**, инженер, аспирант, НТУ «ХПИ»;

**А. Ю. ЧЕРНУХИН**, мл. науч. сотр., аспирант, НТУ «ХПИ»

## **ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧЕК ПОРАЖЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ДЛИННОЙ ИСКРОЙ**

В статье приведены результаты экспериментальных исследований поражения искровым разрядом плоскости в различных системах электродов, моделирующих разряд молнии в зоне ориентации направления на объект. Проведен анализ распределения точек поражения, а также статистических характеристик полученных результатов и их корреляции с геометрией моделирующей электродной системы.

**Ключевые слова:** искровой разряд, закон распределения точек поражения, система электродов.

**Постановка проблемы.** Изменения экологической обстановки на планете в целом и усиление влияния на экологию промышленного производства привело к значительному росту грозовой деятельности, что вызвало увеличение количества поражений разрядом молнии различных объектов и связанных с ними убытков. Этим определяется особый научный интерес к вопросам молниезащиты, а также процессам формирования и развития разряда молнии.

© Г.М.Колиушко, П.Н.Мельников, О.С.Недзельский, А.А.Петков, С.С.Руденко, А.Ю.Чернухин, 2013

**Анализ публикаций.** В настоящее время наиболее распространенным методом моделирования поражения молнией заземленных объектов является использование в системе электродов «стержень-плоскость» длинной искры, образованной импульсом напряжения положительной полярности с длительностью фронта от нескольких сотен до тысяч микросекунд, что определяет большой разброс точек поражения в модели, характерный и для молнии [1–5].

В [1] исследована вероятность поражения длинной искрой стержня, имитирующего объект (стержень-объект) и расположенного на заземленной плоскости, при положительной полярности импульса напряжения с длительностью фронта 3 мс и длинах разрядного промежутка (РП) 10 и 15 м. Отношении высоты стержня-объекта к длине РП равнялось 5 и 10. Получена зависимость коэффициента поражаемости стержня-объекта, расположенного между двумя молниеотводами (МО), при длине РП равном 2,5, 5, 10 и 15 м, а также отношении длины РП к высоте МО равным 10 и к высоте объекта равным 20.

В [2] описаны результаты испытаний по исследованию поражения заземленной плоскости и размещенных на ней объектов искровым разрядом положительной полярности. Получена зависимость расстояния между двумя стержнями от относительной величины РП, приведенной к высоте МО, при длине РП равном 2,5, 5, 10 и 15 м.

В [3] проведена серия экспериментов по поражению плоскости длинной искрой импульса напряжения положительной полярности с длительностью фронта 250 и 4000 мкс при длине РП равной 5 м. Получен закон распределения вероятности поражения одиночного стержня при различных высотах стержня.

В [4] получен закон распределения поражения плоскости импульсами напряжения положительной полярности со временем нарастания равным 1000 мкс при длине РП равном 1,26 м. При этом для фиксации координаты поражения плоскости была использована мишень, выполненная на бумаге толщиной в 100 мкм, а стержневой электрод, имитирующий заряженный элемент облака, устанавливался на верхней потенциальной плоскости электродной системы.

В [5] был получен закон распределения поражения электрическим разрядом заземленной плоскости и размещенных на ней проводящих объектов для длины РП 3 м. При этом для фиксации координат точек поражения плоскости была использована подобная описанной в [4] бумажная мишень, а электрод, имитирующий заряженный элемент облака, был подвешен с помощью изоляционных тросов и представлял собой заостренный металлический стержень.

Полученный опыт проведения экспериментальных исследований по поражению длинной искрой плоскости и размещенных на ней объектов вызвал ряд вопросов, связанных с влиянием на статистические характеристики их поражения таких факторов, как: материала, из которого выполнена мишень,

формы электрода, наличия верхней плоскости в электродной системе, а также длины РП. В литературе [1 – 5] отсутствуют выводы о корреляции распределения точек поражения плоскости, полученных при различных величинах РП, без МО или при сохранении относительной длины РП, приведенной к высоте МО.

**Целью** настоящей работы является изучение влияния ряда факторов на распределение точек поражения в системе электродов «стержень-плоскость» при наличии стержня-объекта и без него.

**Материалы и результаты исследований.** Для достижения поставленной цели в работе решаются задачи по набору экспериментальных данных и их анализу при поражении плоскости и размещенного на ней стержня-объекта при различных величинах РП и материала мишени.

Формирование набора экспериментальных данных проводилось на базе высоковольтного электрофизического стенда ГИН-1,2 (НИПКИ «Молния»).

Эквивалентная электрическая схема разрядного контура генератора импульсов напряжения (ГИН) стенда представлена на рис. 1

В табл. 1 приведены расчетные значения величин параметров элементов схемы разрядного контура ГИН-1,2 для различных экспериментов.

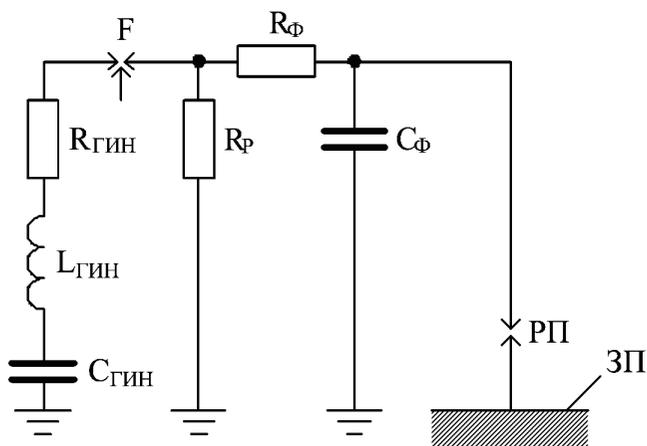


Рисунок 1 – Эквивалентная электрическая схема разрядного контура генератора импульсов напряжения (ГИН) стенда:  $C_{\text{ГИН}}$ ,  $L_{\text{ГИН}}$ ,  $R_{\text{ГИН}}$  – емкость, индуктивность и активное сопротивление разрядной цепи ГИН соответственно;  $F$  – эквивалент управляемого разрядника ГИН;  $R_{\text{р}}$  – разрядный резистор;  $R_{\text{Ф}}$  – резистор, формирующий фронт импульса;  $C_{\text{Ф}}$  – емкость, формирующая фронт импульса; РП – разрядный промежуток; ЗП – заземленная плоскость

Формирующая емкость  $C_{\text{Ф}}$  (см. рис. 1) представляла собой систему двух параллельных плоскостей. Размерам нижней плоскости  $6,69 \text{ м} \times 4,15 \text{ м}$ , верхней плоскости –  $5,24 \text{ м} \times 4 \text{ м}$  и расстояние между плоскостями  $2,07 \text{ м}$  [4].

Таблица 1 – Параметры элементов разрядного контура ГИН

Номер эксперимента	$C_{\text{гин, нФ}}$	$L_{\text{гин, мкГн}}$	$R_{\text{гин, Ом}}$	$R_p, \text{кОм}$	$R_{\text{ф, кОм}}$	$C_{\text{ф, нФ}}$	$U_{\text{max, кВ}}$
1	30	13	130	415	560	0,2	640 – 660
2, 3	30	13	130	415	630	0,2	480
4	30	13	130	415	560	0,2	$\leq 800$

### 1 Исследование влияния материала мишени на распределение точек поражения плоскости

Для фиксации точек поражения плоскости электрическим разрядом могут быть применены различные способы. Вне зависимости от примененного способа задача фиксации состоит в определении положения точки поражения в принятой системе координат. В качестве системы координат целесообразно использовать полярную систему с центром, совпадающим с точкой пересечения плоскости поражения осью стержня, с которого развивается разряд [2–4].

Наиболее полную информацию можно получить с использованием кино- или фотосъемки [1–3]. Этот способ характеризуется значительными техническими сложностями и материальными затратами. Более простым и менее затратным является фиксирование точки поражения по прожогам бумажной мишени толщиной 100 мкм, на которой нанесена система координат [4]. Однако при этом встает вопрос о влиянии диэлектрического материала мишени на распределение точек поражения. Для оценки этого влияния было проведено сравнение экспериментальных данных полученных с использованием бумажной мишени [4] (длина РП  $l_{\text{рп}} = 1,26$  м) и данных дополнительного эксперимента №1, отличающихся тем, что вместо бумажной мишени использовался лист фольгированного стеклотекстолита СТЭФ, гальванически соединенный с заземленной плоскостью. В эксперименте №1 фиксация точек поражения осуществлялась с помощью фотосъемки. Фрагмент импульсного пробоя РП между стержнем и мишенью из фольгированного СТЭФ приведен на рис. 2.

При проведении эксперимента № 1 амплитуда импульсного напряжения разряда составляла 640-660 кВ.

Пробой РП происходил в диапазоне времени от 450 до 1400 мкс, что соответствует 85 и 99 % зарядного напряжения.

На рис. 3 показаны эмпирические функции распределения точек поражения  $F_s(r)$  заземленной плоскости, полученные в [4] (кривая 1) и на основании эксперимента № 1 (кривая 2).

Характер кривых 1 и 2 (см. рис. 3) позволяет предположить, что выборки данных двух экспериментов принадлежат одной генеральной совокупности. Для подтверждения истинности этого используем критерий Вилкоксона [6].

Учитывая, что методика и атмосферные условия проведения экспериментов были идентичны, а отличие заключалось лишь в материале исполь-

зуюмой мишени, результаты проверки по критерию Вилкоксона позволяют оценить степень влияния изоляционных свойств бумаги на распределение точек поражения.

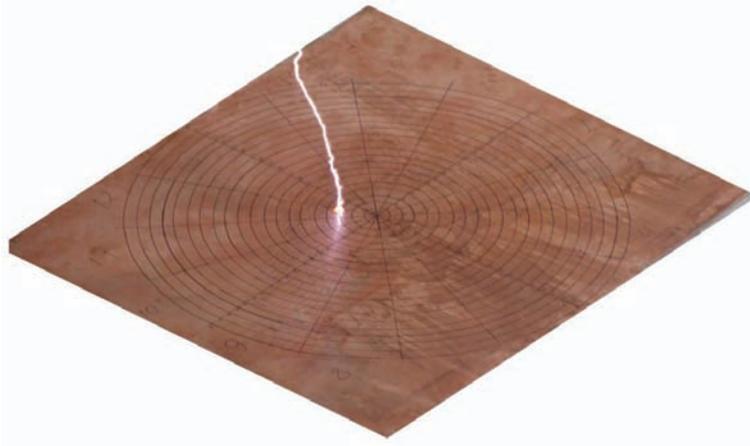


Рисунок 2 – Фрагмент импульсного пробоя РП

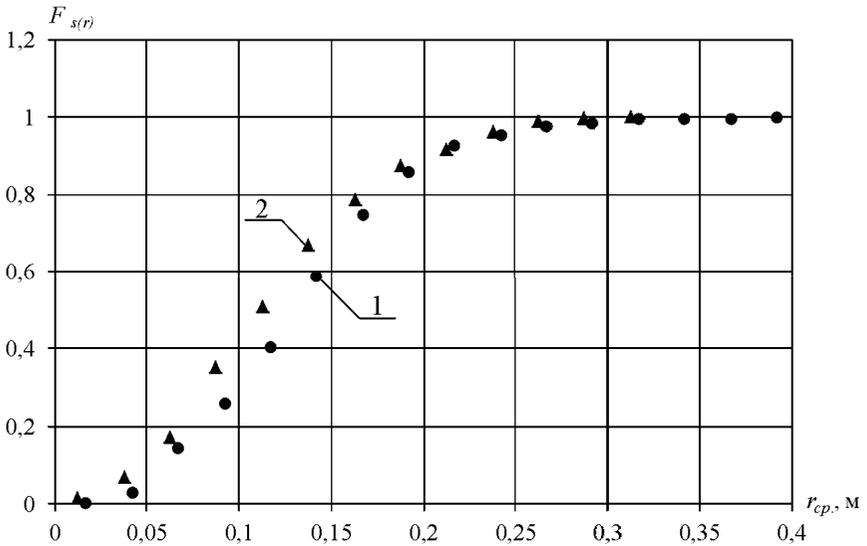


Рисунок 3 – Эмпирические функции распределения точек поражения  $F_s(r)$  заземленной плоскости: 1 – Эксперимент, описанный в [4]; 2 – Эксперимент № 1

При проведении статистических исследований нулевая гипотеза  $H_0$  состояла в том, что при всех значениях аргумента функция распределения кри-

вой 1 (см. рис. 3) равна функции распределения кривой 2, то есть  $H_0: F_{1S}(r) = F_{2S}(r)$ . Конкурирующая гипотеза  $H_1: F_{1S}(r) \neq F_{2S}(r)$ .

Результаты обработки экспериментальных данных согласно [6] приведены в табл. 2 (уровень значимости принимался  $\alpha = 0,01$ ).

Таблица 2 – Результаты сравнения данных эксперимента №1 и данных [4]

Количество данных эксперимента [4], $n_1$	Количество данных эксперимента № 1, $n_2$	Критические точки:		Наблюдаемое значение критерия, $W_{\text{набл.}}$
		нижняя, $w_{\text{нижн. кр.}}$	верхняя, $w_{\text{верх. кр.}}$	
234	250	52777	60713	55274

Для данных выборок выполняется условие  $w_{\text{нижн. кр.}} < W_{\text{набл.}} < w_{\text{верх. кр.}}$  (см. табл. 2), поэтому, согласно [6], принимаем нулевую гипотезу – эмпирические функции распределения точек поражения плоскости двух экспериментов равны.

Из этого факта следует что:

а) влияние бумажной мишени толщиной 100 мкм на распределение точек поражения заземленной плоскости незначительно и в дальнейших экспериментах могут быть использованы подобные мишени, что значительно упрощает фиксацию точек поражения;

б) результаты экспериментов №1 и [4] могут быть объединены в единую совокупность данных.

## 2 Исследование влияния формы верхнего электрода стержня

Развитие разряда в рассматриваемой системе электродов «стержень-плоскость» в его начальной стадии определяется уровнем напряженности электрического поля на иницирующем конце электрода-стержня.

В свою очередь эта напряженность зависит от геометрии электрода, в частности наличия концевых участков с малыми радиусами скругления (то есть максимальной кривизной), какими могут быть острия, торцевые кромки, микровыступы и т.п. В ряде работ [1–5] по изучению распределения точек поражения длинным искровым разрядом заземленной плоскости и размещенных на ней объектов в качестве верхнего (потенциального) электрода использовался металлический стержень с определенной геометрией (диаметр, длина, конфигурация концевой части). Однако в указанной литературе не встречается обоснования выбранной геометрии и влияния ее на распределение точек поражения плоскости либо размещенных на ней объектов.

Для оценки влияния геометрии потенциального стержня на распределение точек поражения был выполнен эксперимент № 2, который заключался в проведении испытаний в системе «стержень-плоскость» с двумя типами стержней. План размещения элементов высоковольтного исследовательского стенда показан на рис. 4.

В качестве потенциальных электродов были использованы стержни: шестигранной формы с плоским торцом (эксперимент № 2.1) и цилиндрической с заостренным торцом (эксперимент № 2.2). Специальные меры для сглажи-

вания острых кромок после механической обработки электродов не применялись. Длина РП в этой системе составляла  $l_{РП} = 0,78$  м. На заземленной плоскости размещался шаблон с бумажной мишенью.

Эксперименты проводились при подаче импульсов напряжения с амплитудой 480 кВ. Пробой РП происходил в диапазоне времени од 400 до 1100 мкс.



Рисунок 4 – План размещения элементов высоковольтного исследовательского

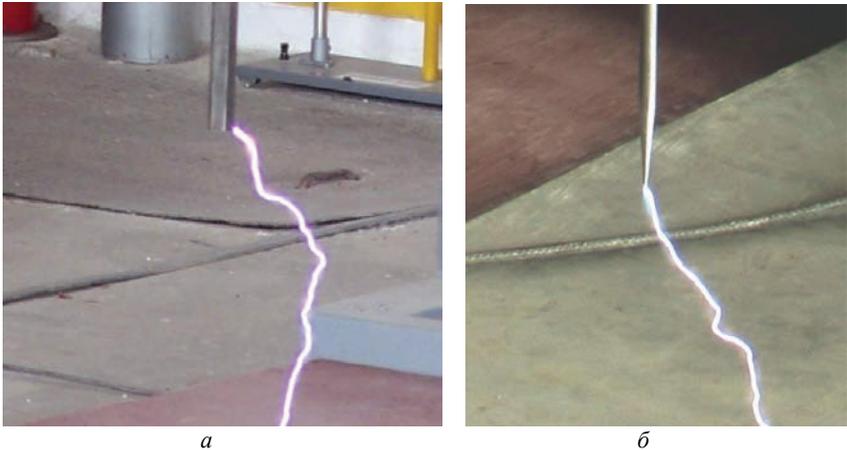


Рисунок 5 – Формирование разряда при различной форме электрода: *а* – шестигранник с плоским торцом; *б* – цилиндрический с заостренным торцом

На рис. 5 показано формирование разряда при различной форме электрода.

На рис. 6 показаны эмпирические функции распределения точек поражения заземленной плоскости, полученные для экспериментов №2.1 (кривая 1) и № 2.2 (кривая 2).

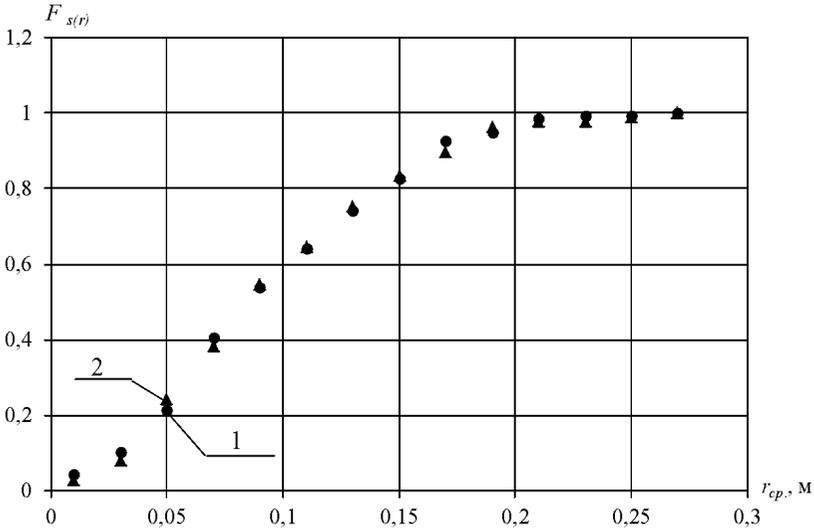


Рисунок 6 – Эмпирические функции распределения точек поражения заземленной плоскости: 1 – Эксперимент № 2.1; 2 – Эксперимент № 2.2

Аналогично п. 1 для экспериментов № 2.1 и № 2.2 выполнена проверка на принадлежность их результатов одной генеральной совокупности.

При проведении статистических исследований нулевая гипотеза  $H_0$  состояла в том, что при всех значениях аргумента функция распределения точек поражения в эксперименте № 2.1 равна функции распределения точек поражения в эксперименте № 2.2, то есть  $H_0: F_{2.1S}(r) = F_{2.2S}(r)$ . Конкурирующей гипотезой являлась  $H_1: F_{2.1S}(r) \neq F_{2.2S}(r)$ .

Результаты обработки экспериментальных данных согласно [6] приведены в табл. 3 (уровень значимости принимался  $\alpha = 0,01$ ).

Таблица 3 – Результаты обработки данных эксперимента №2

Количество данных эксперимента № 2.2, $n_1$	Количество данных эксперимента № 2.1, $n_2$	Критические точки:		Наблюдаемое значение критерия, $W_{набл.}$
		нижняя, $W_{нижн.кр.}$	верхняя, $W_{верх.кр.}$	
192	202	35004	40836	37793

Для данных выборок выполняется условие  $w_{нижн.кр.} < W_{набл.} < w_{верх.кр.}$ .

(см. табл. 3), поэтому, согласно [6], принимаем нулевую гипотезу – эмпирические функции распределения точек поражения плоскости в двух экспериментах равны.

Таким образом, влияние формы стержневого электрода на распределение точек поражения является не существенным и две выборки данных могут быть объединены.

### **3 Исследование влияния геометрических размеров электродной системы и наличия верхней плоскости**

Полученные в системе электродов «стержень-плоскость» экспериментальные данные представляют собой совокупность результатов испытаний для трех систем электродов при различных длинах РП, которые могут быть объединены в следующие наборы:

1) набор А – включает в себя результаты эксперимента № 1 с мишенью из фольгированного СТЭФ и экспериментов с бумажной мишенью [4]. Данные эксперименты проводились в одних и тех же условиях: закрытое помещение, РП располагался внутри пространства между верхней и нижней плоскостями формирующей емкости, длина РП составляла  $l_{РП} = 1,26$  м;

2) набор Б – включает в себя результаты эксперимента № 2, проведенного в закрытом помещении, РП вынесен за пределы пространства между верхней и нижней плоскостью формирующей емкости (рис. 4), длина РП составляла  $l_{РП} = 0,78$  м;

3) набор В – включает в себя результаты эксперимента, приведенные в [5]. Система электродов располагалась на открытом воздухе, а длина РП составляла  $l_{РП} = 3$  м.

Для сравнения результатов полученных при различных длинах РП перейдем к приведенному радиусу  $r^* = r / l_{РП}$ , где  $l_{РП}$  – длина РП,  $r$  – радиус-расстояние до точек поражения.

На рис. 7 приведены эмпирические функции распределения точек поражения заземленной плоскости для наборов данных А – В.

Аналогично п.1 были попарно проведены обработки для наборов А-В.

Для оценки влияния верхнего электрода формирующей емкости на распределение точек поражения сравним наборы данных А и Б, а также А и В.

1) При проведении статистических исследований нулевая гипотеза  $H_0$  состояла в том, что при всех значениях аргумента функция распределения точек поражения в наборе данных Б равна функции распределения точек поражения набора А, то есть  $H_0: F_{БС}(r) = F_{АС}(r)$ . Конкурирующей гипотезой являлась  $H_1: F_{БС}(r) \neq F_{АС}(r)$ .

Результаты обработки экспериментальных данных согласно [6] приведены в табл. 4 (уровень значимости принимался  $\alpha = 0,01$ ).

Для данных выборок условие  $w_{нижн. кр.} < W_{набл.} < w_{верх. кр.}$  (см. табл. 4) не выполняется, поэтому, согласно [6], нулевая гипотеза отбрасывается. Это означает, что эмпирические функции распределения точек поражения для

двух экспериментов не равны.

2) При проведении статистических исследований нулевая гипотеза  $H_0$  состояла в том, что при всех значениях аргумента функция распределения точек поражения набора В равна функции распределения точек поражения набора А, то есть  $H_0: F_{BS}(r) = F_{AS}(r)$ . Конкурирующей гипотезой являлась  $H_1: F_{BS}(r) \neq F_{AS}(r)$ .

Результаты обработки экспериментальных данных согласно [6] приведены в табл. 5, при этом уровень значимости равен  $\alpha = 0,01$ .

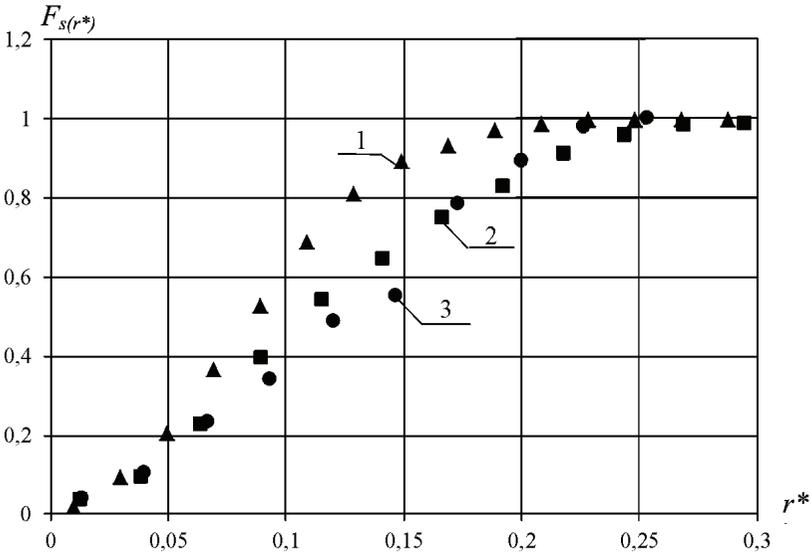


Рисунок 7 – эмпирические функции распределения точек поражения заземленной плоскости: 1 – Набор А; 2 – Набор Б; 3 – Набор В

Таблица 4 – Результаты обработки данных при  $l_{PI} = 1,26$  м и  $l_{PI} = 0,78$  м

Количество дан-ных набора Б, $n_1$	Количество дан-ных набора А, $n_2$	Критические точки:		Наблюдаемое зна-чение критерия, $W$ набл.
		нижняя, $w_{\text{нижн. кр.}}$	верхняя, $w_{\text{верх. кр.}}$	
394	484	163519	182807	43315

Таблица 5 – Результаты обработки данных при  $l_{PI} = 1,26$  м и  $l_{PI} = 3$  м

Количество дан-ных набора В, $n_1$	Количество дан-ных набора А, $n_2$	Критические точки:		Наблюдаемое зна-чение критерия, $W$ набл.
		нижняя, $w_{\text{нижн. кр.}}$	верхняя, $w_{\text{верх. кр.}}$	
48	484	10170	15414	8271

Для данных выборок условие  $w_{\text{нижн. кр.}} < W_{\text{набл.}} < w_{\text{верх. кр.}}$  не выполняется (см. табл. 5). Это означает, что эмпирические функции распределения точек

поражения для двух экспериментов не равны.

Таким образом, наличие верхнего электрода-плоскости (набор данных А) существенно влияет на распределение точек поражения.

Для оценки влияния внешних условий расположения РП (закрытое помещение и открытая площадка) сравним наборы Б и В.

3) При проведении статистических исследований нулевая гипотеза  $H_0$  состояла в том, что при всех значениях аргумента функция распределения точек поражения набора данных В равна функции распределения точек поражения набора данных Б, то есть  $H_0: F_{BS}(r) = F_{BS}(r)$ . Конкурирующая гипотеза –  $H_1: F_{BS}(r) \neq F_{BS}(r)$ .

Результаты обработки экспериментальных данных согласно [6] приведены в табл. 6 (уровень значимости принимался  $\alpha = 0,01$ ).

Таблица 6 – Результаты обработки данных при  $l_{РП} = 0,78$  м и  $l_{РП} = 3$  м

Количество данных модель А, $n_1$	Количество данных модель Б, $n_2$	Критические точки:		Наблюдаемое значение критерия, $W_{набл.}$
		нижняя, $W_{нижн. кр.}$	верхняя, $W_{верх. кр.}$	
48	394	8475	12789	11156

Для данных выборок выполняется условие  $w_{нижн. кр.} < W_{набл.} < w_{верх. кр.}$  (см. табл. 6), поэтому, согласно [6], принимается нулевая гипотеза – эмпирические функции распределения двух экспериментов равны, то есть влияние внешних условий не значительно.

Таким образом, наборы данных Б и В могут быть объединены в случае перехода к приведенному радиусу.

#### 4 Анализ влияния установки стержня-объекта

При исследовании закономерностей распределения точек поражения был проведен ряд экспериментов с установленным на поверхности мишени стержнем-объектом.

В эксперименте № 3 была сохранена та же конфигурация электрических параметров и электродной системы, что и в эксперименте №2 (длина РП  $l_{РП3} = 0,78$  м, верхний электрод – стержень шестигранной формы с плоским торцом), при этом в центре мишени был установлен стержень-объект высотой  $h_3 = 18$  мм и диаметром 5 мм. Ось верхнего электрода совпадает с центром координат мишени.

Всего было сделано 300 разрядов, из них 103 поразили мишень, а остальные – стержень-объект. На рис. 8 показан фрагмент пробоя РП с поражением стержня-объекта и мишени.

В эксперименте №4 в качестве системы электродов была использована нижняя плоскость формирующей емкости с установленным на верхней плоскости электродом-стержнем. При этом на нижнем электроде-плоскости в центре мишени был установлен стержень-объект высотой  $h_4 = 29$  мм и диаметром 5 мм, длина РП равнялась  $l_{РП4} = 1,26$  м.

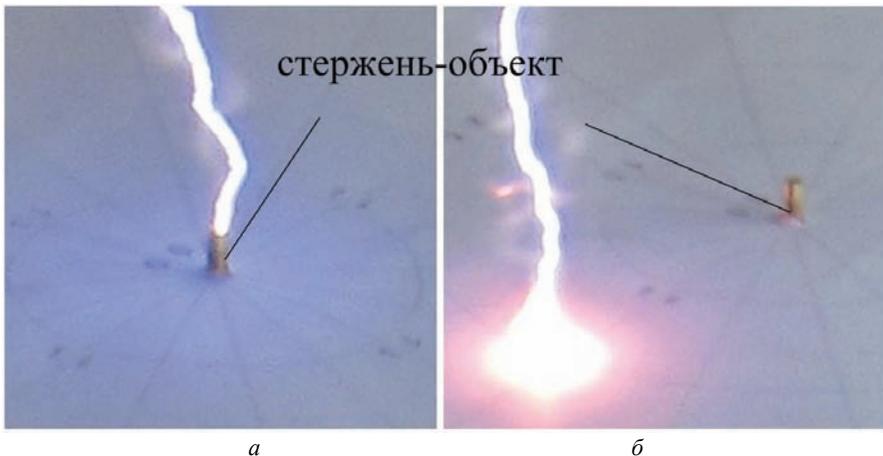


Рисунок 8 – фрагмент пробоя РП с поражением стержня-объекта и мишени:  
*а* – поражение стержня-объекта; *б* – поражение мишени

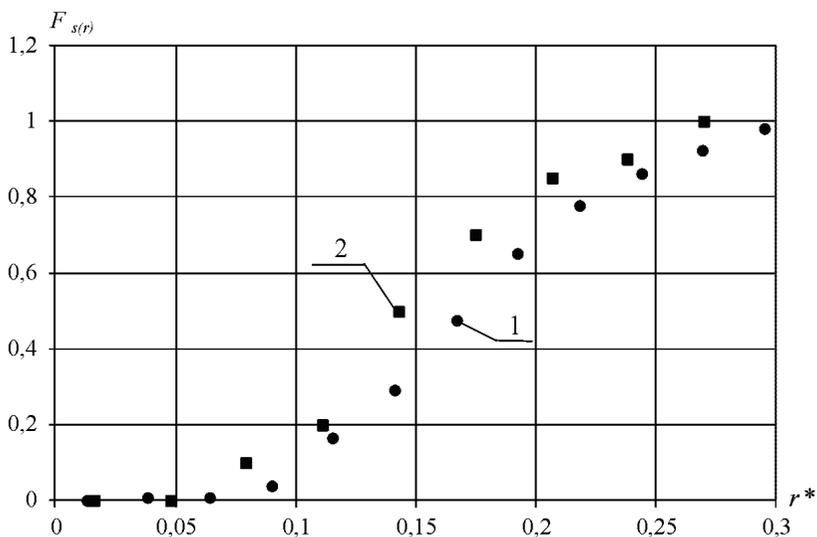


Рисунок 9 – Эмпирические функции распределение точек поражения заземленной плоскости: 1 – эксперимент №3; 2 – эксперимент №4

Всего было сделано 300 разрядов, из них 20 поразили мишень, остальные – стержень-объект.

Как видно из приведенных данных для экспериментов № 3 и № 4 выполняется соотношение  $\frac{h_3}{l_{\text{РП3}}} = \frac{h_4}{l_{\text{РП4}}}$ , то есть электродные системы геометри-

чески подобны. При дальнейшем анализе, аналогично п. 3, было проведено исследование однородности выборок при переходе к приведенному радиусу.

На рис. 9 показаны эмпирические функции распределение точек поражения заземленной плоскости, построенные относительно приведенного радиуса, для экспериментов № 3 и № 4.

Результаты обработки экспериментальных данных согласно [6] приведены в табл. 7 (уровень значимости принимался  $\alpha = 0,01$ ).

Таблица 7 – Результаты обработки экспериментальных данных

Количество данных эксперимента № 4, $n_1$	Количество данных эксперимента № 3, $n_2$	Критические точки:		Наблюдаемое значение критерия, $W_{набл.}$
		нижняя, $W_{нижн. кр.}$	верхняя, $W_{верх. кр.}$	
20	103	863	1617	1049

Для данных выборок выполняется условие  $w_{нижн. кр.} < W_{набл.} < w_{верх. кр.}$  (см. табл. 7), поэтому, согласно [6], принимается нулевая гипотеза – эмпирические функции распределения точек поражения плоскости в двух экспериментах для приведенных радиусов равны.

Таким образом, анализ данных экспериментов показывает, что введение в РП стержня-объекта ослабляет влияние верхней плоскости формирующей емкости на распределение точек поражения; при использовании приведенного радиуса данные экспериментов № 3 и № 4 для дальнейшего анализа могут быть объединены в единую совокупность; данные экспериментов могут быть распространены на геометрически подобные системы электродов.

## Выводы

1. Определены экспериментальные функции распределения точек поражения длиной искрой заземленной плоскости при длине РП 0,78 м и 1,26 м в системах электродов стержень-плоскость с наличием стержня-объекта и без него.

2. Для электродных систем «стержень-плоскость» и «стержень-стержень на плоскости» экспериментальным путем доказано, что данные, полученные в геометрически подобных электродных системах могут быть объединены в единые совокупности в случае перехода к приведенному радиусу.

3. Установлено, что материал мишени и форма электрода-стержня не оказывают существенного влияния на распределения точек поражения плоскости.

4. Экспериментальным путем доказано, что влияние верхнего электрода-плоскости на распределение точек поражения является существенным, а установка стержня-объекта, с отношением его высоты к длине РП не менее 0,023, ослабляет это влияние.

**Список источников информации:** 1. К вопросу об оценке защитного действия молниеотводов / Г.Н. Александров, М.М. Зеленецкий, В.Л. Иванов и др. // Известия академии наук

СССР. Энергетика и транспорт. – 1970. – №3. – С. 48–54. **2** Об ориентировке канала длинной искры / *Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, Э.М. Базелян, Е.С. Садыхова* // Электричество. – 1973. – № 3. – С. 63–66. **3.** Волкова О.В. Поражаемость искровым разрядом стержня на плоскости / *О.В. Волкова, А.Р. Корявин* // Электричество. – 1991. – № 5. – С. 52–55. **4.** Экспериментальное исследование поражения плоскости длинной искрой / *Г.М. Колиушко, П.Н. Мельников, О.С. Недзельский* и др. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 21. – С. 146-153. **5.** Экспериментальные исследования поражения заземленной плоскости и размещенных на ней объектов электрическим разрядом в длинном промежутке / *М. И. Баранов, В.И. Доценко, В. М. Зиньковский* и др. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 27. – С. 11-20. **6.** Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике / *В.Е. Гмурман*. – М.: Высшая школа, 2004. – 404 с.

*Поступила в редколлегию 30.10.2013*

УДК 551.594.221

**Влияние конфигурации системы электродов на распределение точек поражения плоскости длинной искрой / Г. М. Колиушко, П. Н. Мельников, О. С. Недзельский, А. А. Петков, С. С. Руденко, А. Ю. Чернухин** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 57-70. – Бібліогр.: 6 назв.

У статті наведено результати експериментальних досліджень враження іскровим розрядом площини в різних системах електродів, моделюючих розряд блискавки в зоні орієнтації напрямку на об'єкт. Проведено аналіз розподілу точок враження, а також статистичних характеристик отриманих результатів та їх кореляції з геометрією моделюючої електродної системи.

**Ключові слова:** іскровий розряд, закон розподілу точок враження, система електродів.

The results of the experimental researches of injury of the plane by the spark discharge in the different electrode systems modeling the strike in the zone of the orientation of direction to the objects are presented in this paper. The effect of the side factors to the distribution of spark points and the statistical characteristics of the received results and their correlation with geometry of modeling simulative electrode system were analyzed.

**Keywords:** spark discharge, distribution function of spark points, electrode system.

**А. И. КОРОБКО**, канд. техн. наук, зав. отд., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;

**З. И. КОРОБКО**, науч. сотр., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

## **ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СУБНАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА НА РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ**

Приведено описание испытательного комплекса для исследований воздействия мощных импульсных электромагнитных полей субнаносекундного диапазона на радиоэлектронные системы. Комплекс включает в себя две независимых системы антенного типа для генерирования в свободном пространстве электромагнитных полей с вертикальной и горизонтальной поляризациями.

**Ключевые слова:** импульсное электромагнитное поле, субнаносекундный диапазон, антенна.

**Введение.** Одной из реальных угроз современного мира является угроза электромагнитного терроризма. Значимость этой угрозы определяется тем фактом, что современный мир характеризуется глобальным применением практически во всех областях высокотехнологичных систем, включающих в себя различные радиоэлектронные системы (РЭС).

Обеспечение бесперебойной работы этих РЭС в кризисных ситуациях (проявление электромагнитного терроризма) является на сегодняшний день крайне актуальной задачей [1-3] и направлено в первую очередь на уменьшение ущерба вооружению, военной технике, а также критическим объектам государственного значения в случае появления электромагнитной угрозы.

Принимая во внимание крайнюю сложность определения уровней стойкости радиоэлектронных компонентов и РЭС к поражающему воздействию сверхмощного электромагнитного излучения (ЭМИ) теоретическим путем, особую актуальность приобретают экспериментальные методы исследований поведения, как отдельных радиоэлектронных компонентов, так и РЭС при воздействии на них импульсного ЭМИ [4-6].

В настоящее время различают два типа испытательных установок для экспериментальных исследований воздействия импульсного ЭМИ на радиоэлектронные компоненты и на РЭС: установки «связанного» типа и установки «свободного типа». К первым относятся установки, в которых система полеобразования выполнена в виде как минимум двусвязной линии передачи, в рабочем объеме которой распространяется квазиплоская или сферическая волна ЭМИ в виде волны Т типа [7,8].

Установки данного типа имеют рабочий диапазон частот от 0 до  $10^{10}$  Гц, позволяют генерировать импульсное ЭМИ с предельными значениями амплитудно-временных параметров (АВП), однако их главный недостаток – ограниченный рабочий объем не позволяет проводить исследования протяженных РЭС, так как размеры исследуемой РЭС потенциально не могут превышать размеры системы полеобразования установок данного типа.

Установки второго типа [9] лишены данного недостатка так как их рабочий объем, располагается в свободном пространстве, что позволяет производить полномасштабные исследования РЭС. Кроме этого, установки данного типа имеют существенно большую верхнюю рабочую частоту, доходящую до сотен гигагерц. К недостаткам установок второго типа следует отнести отличную от нуля нижнюю рабочую частоту.

Ниже приводится описание испытательного комплекса второго типа, предназначенного для проведения исследований воздействия мощного ЭМИ субнаносекундного диапазона на РЭС.

### **Состав и описание испытательного комплекса.**

Испытательный комплекс (см. рис.) состоит из двух независимых систем, генерирующих ЭМИ с вертикальной и горизонтальной поляризациями. Состав и основные технические характеристики данных систем одинаковы (за исключением поляризации). Каждая из систем включает в себя следующие составные части:

- блок питания;
- импульсный источник питания;
- генератор импульсного СВЧ излучения;
- систему газообеспечения;
- антенную систему;
- систему управления.

Блок питания преобразует исходное напряжение питающей сети 220В в первичное импульсное напряжение, которое преобразуется высоковольтным импульсным источником питания в высокое импульсное напряжение с максимальным значением 100 кВ, и временем нарастания около 3 нс.

Высокое импульсное напряжение преобразуется генератором импульсного СВЧ излучения плазменного типа в импульсное ЭМИ, которое направляется с помощью антенной системы на исследуемую радиоэлектронную систему.

Система газообеспечения производит охлаждение плазмообразующего газа, используемого в генераторе импульсного СВЧ излучения с целью обеспечения бесперебойной его работы длительное время в частотном режиме.

Каждая из антенных систем выполнена в виде параболической зеркальной антенны офсетного типа, размещенной на опорно-поворотной платформе.

Система управления обеспечивает работу комплекса как в режиме одиночных импульсов, так и в частотном режиме.



Рисунок – Испытательный комплекс (слева – горизонтальная поляризация, справа – вертикальная поляризация)

**Основные технические характеристики комплекса.** Комплекс и его составные части имеют следующие основные характеристики.

**Основные амплитудно-временные и пространственные параметры излучаемого ЭМИ.**

1. Вид излучения – линейно поляризованная сферическая Т-волна в виде радиоимпульса с амплитудно-временными характеристиками типа

$$E(t) = E_m \cdot I(t) \cdot \exp(-t/\tau) \cdot \sin(\omega t); \quad E(t) = 377 \cdot H(t),$$

где  $E(t)$  и  $H(t)$  – электрическая и магнитная составляющие импульсного электромагнитного поля;  $I(t)$  – единичная функция;  $E_m$  и  $H_m$  – максимальные значения импульсов,  $\tau$  – постоянная спада;  $\omega$  – центральная циклическая частота заполнения ( $\tau = 8 \cdot 10^{-9}$  с,  $\omega = 7 \cdot 10^9$  1/с).

2. Частота следования импульсов – 100 Гц и режим одиночных импульсов.

3. Максимальное значение электрической составляющей ЭМИ на апертурной поверхности зеркальной антенны 57 кВ/м – горизонтальная поляризация; 51 кВ/м – вертикальная поляризация.

4. Угол расходимости ЭМИ в плоскости большой оси зеркальной антенны –  $9^\circ$ .

5. Угол расходимости ЭМИ в плоскости малой оси зеркальной антенны –  $12^\circ$ .

**Основные характеристики антенной системы.** Антенная система имеет следующие основные характеристики.

1. Тип антенной системы – офсетная зеркальная параболическая антенна.
2. Полные размеры антенны по большой/малой осям – (1600/1446) мм.
3. Размеры эффективной поверхности антенны по большой/малой осям – (1550/1396) мм.
4. Фокусное расстояние – 790 мм.
5. Отношение  $F/D = 0,577$ .
6. Материал зеркала – полированный алюминий толщиной 1,5 мм.
7. Угол наведения в вертикальной плоскости:  $-5^\circ \dots +90^\circ$ .
8. Угол наведения в горизонтальной плоскости –  $360^\circ$ .

**Условия проведения исследований.**

1. Исследования проводятся в открытом полупространстве, ограниченном грунтом.

2. В процессе исследований объект исследований постепенно перемещается по лучу, связывающему фазовый центр антенной системы и геометрический центр объекта испытаний без изменения ориентации последнего до момента появления отказов. При этом возможно как перемещение объекта исследований, так и самого испытательного комплекса.

4. Для контроля за величиной отраженного от поверхности грунта импульсного ЭМИ в процессе испытаний в точке размещения испытуемого объекта производилось измерение электрической и магнитной составляющих импульсного ЭМИ, генерируемого испытательным комплексом при отсутствии объекта исследований. При этом расположение и ориентация комплекса и объекта исследований по отношению к поверхности грунта выбиралось таким образом, что величины модулей коэффициентов отражения по  $E$  и  $H$  полю от поверхности грунта не превышала 10%.

5. АВП импульсного электромагнитного поля генерируемого испытательным комплексом в рабочем объеме контролируются с помощью нестандартных измерителей НИЭП-3 и НИМП-3 с использованием кабельной системы передачи аналоговой информации с обеспечением квазигальванической развязки измерительных преобразователей от «земли». В качестве регистратора использовался аналоговый осциллограф С7-19.

6. Дополнительно в процессе исследований с помощью прибора радиоразведки OSCAR-5000 контролировались амплитудно-частотные характеристики излучаемого импульсного электромагнитного поля в частотном диапазоне 50 кГц -2,8 ГГц.

**Заключение.** Приведено описание и основные характеристики испытательного комплекса и его составных частей для проведения исследований воздействия мощных импульсных электромагнитных полей субнаносекундного диапазона на радиоэлектронные системы.

**Список литературы:** 1. *Рикетс Л.У., Бриджес Дж.Э., Майлетта Дж.* Электромагнитный импульс и методы защиты : Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1979. – 327 с. 2. *Белоус В.* Угроза использования ЭМИ-оружия в военных и террористических целях // Ядерный контроль. – 2005. – № 1 (75), т. 11. – С. 133–140. 3. *Коробко А.И., Коробко З.И.* Реальные уровни стойкости различной радиоэлектронной аппаратуры к воздействию импульсного электромагнитного излучения СВЧ – диапазона // Сборник научных трудов 2-го Международного радиотехнического форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». – Х.: НТУ «ХПИ», 2005. – Т. 6. – С. 96. 4. *Мырова Л.О., Чепыженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям : 2-е изд. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с. 5. *Коробко А.И., Коробко З.И.* Математическое статистическое моделирование поведения элементов радиоэлектронной аппаратуры при воздействии сверхмощного электромагнитного излучения // Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», 4-6 червня 2008 р., Харків : у 2 ч. – Ч. 2. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – С. 351. 6. *Коробко А.И., Коробко З.И.* Методика обработки результатов экспериментальных исследований по определению стойкости радиоэлектронных компонентов к поражающему воздействию электромагнитного излучения, свойственного проявлениям электромагнитного терроризма // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – № 39. – С. 100-105. 7. *Бердин С. А., Галецкий Н.П., Гапоненко Н.И.* Испытательный стенд для исследования действия импульсных полей сверхкороткой длительности // Сборник научных трудов 2-го Международного радиотехнического форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». – Х.: ННЦ «ХФТИ», 2005. – Т. 6. – С. 47-50. 8. *Кравченко В.И., Немченко Ю.С.* Исходный эталон Украины импульсных и магнитных полей, цель создания эталона и требования к его метрологическим и конструктивным характеристикам // Сборник научных трудов 2-го Международного радиотехнического форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». – Х.: НТУ «ХПИ», 2005. – Т. 6. – С. 82-83. 9. *C. E. Baum, J. P. O'Loughlin* JOLT: A Highly Directive, Very Intensive, Impulse-Like Radiator // IEEE. – Vol. 92, № 7, JULY 2004. – PP. 1096-1109.

*Надійшла до редакції 30.10.2013*

УДК 621.373.32

**Испытательный комплекс для исследований воздействия мощных импульсных электромагнитных полей субнаносекундного диапазона на радиоэлектронные системы / А.И. Коробко, З.И. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 71-75. – Бібліогр.: 9 назв.**

Надається опис випробувального комплексу для досліджень дії потужних електромагнітних полів субнаносекундного діапазона на радіоелектронні системи. До складу комплексу входять дві незалежні системи антенного типу для генерування в вільному просторі електромагнітних полів з вертикальною та горизонтальною поляризація ми.

**Ключові слова:** імпульсне електромагнітне поле, субнаносекундний діапазон, антенна.

Describes the test complex for studying the influence of powerful pulsed electromagnetic fields subnanosecond range of the radio-electromagnetic systems. The complex consists of two independent systems for generating in the free space of the electromagnetic field with vertical and horizontal polarizations.

**Keywords:** pulsed electromagnetic field, subnanosecond range, antenna.

**Ю. С. НЕМЧЕНКО**, гл. метролог, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;  
**В. В. КНЯЗЕВ**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НИПКИ «Молния»  
НТУ «ХПИ»;  
**И. П. ЛЕСНОЙ**, зав. лаб., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;  
**С. Б. СОМХИЕВ**, вед. инженер, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;  
**Т. Н. ОСТРОВЕРХ**, вед. инженер, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

## **ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОГО АВИАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ВОСПРИИМЧИВОСТЬ К ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ, ВЫЗВАННЫМ МОЛНИЕЙ («ВВОД В ЗАЗЕМЛЕНИЕ»)**

Описана конструкция и результаты аттестации генератора, предназначенного для испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией, в соответствии с требованиями международных стандартов. Генератор создает импульсы напряжения и тока форм 4 и 5А по пяти уровнях испытаний. Испытания проводятся методом «ввода в заземление».

**Ключевые слова:** испытания, бортовое оборудование, восприимчивость, молния, переходные процессы, генератор, аттестация

**Введение.** В настоящее время обязательным видом испытаний бортового электротехнического и электронного оборудования (БАО) летательных аппаратов являются испытания на невосприимчивость 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 RTCA-DO-160D «Условия окружающей среды и методики испытаний бортового оборудования», Раздел 22: «Восприимчивость к переходным процессам, наведенным молнией» (отечественный аналог этого документа КТ-160D [1]). Этот НД с 2004 года распространяется на все типы БАО, выпускаемые в Украине и странах СНГ. Всего в этом разделе стандарта предусмотрено много видов испытаний БАО на молниестойкость, и в частности, испытания методом нагружения цепей заземления БАО однократными им-

пульсами напряжения или тока (так называемый метод «ВВОДА В ЗАЗЕМЛЕНИЕ»).

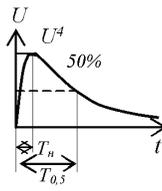
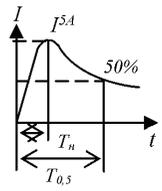
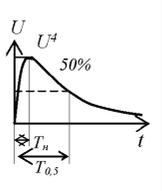
**Основные результаты.** Разработанный и изготовленный для этой цели генератор ИГЛА-ЗВ предназначен для проведения данного вида испытаний по пяти испытательным уровням импульсами испытательных напряжений и токов обеих полярностей в соответствии с п. 22.5.2.2 раздела 22.0 КТ-160Д.

В генераторе предусмотрено два режима генерирования импульсов:

- режим испытательного напряжения формы 4 и предельного тока (форма не регламентируется);
- режим испытательного тока формы 5А и предельного напряжения (холодного хода генератора) формы 4.

Выходные параметры испытательной установки ИГЛА-ЗВ полностью соответствуют требованиям к ней нормативной документации и приведены в таблице.

Таблица – Выходные параметры испытательной установки ИГЛА-ЗВ

Параметр	Испытательное напряжение $U_{исп}^4$	Предельный ток $I_{пред}$	Испытательный ток $I_{исп}^{5A}$	Предельное напряжение $U_{пред}^4$
1 Форма импульса		форма не регламентируется		
2 Уровни испытаний:				
1	<b>(50 + 5) В</b>	(100 + 10) А	<b>(150 + 15) А</b>	(50 + 5) В
2	<b>(125 + 13) В</b>	(250 + 25) А	<b>(400 + 40) А</b>	(125 + 13) В
3	<b>(300 + 30) В</b>	(600 + 60) А	<b>(1000 + 100) А</b>	(300 + 30) В
4	<b>(750 + 75) В</b>	(1500 + 150) А	<b>(2000 + 200) А</b>	(750 + 75) В
5	<b>(1600 + 160) В</b>	(3200 + 320) А	<b>(5000 + 500) А</b>	(1600 + 160) В
3 Время нарастания, $T_n$ , мкс	<b>6,4 ± 1,28</b>	не нормирован	<b>40 ± 8</b>	6,4 ± 1,28
4 Время спада, $T_{0,5}$ , мкс	<b>69 ± 13,8</b>	не нормирован	<b>120 ± 24</b>	69 ± 13,8

Общий вид генератора ИГЛА-ЗВ приведен на рис.1, а его структурная схема – на рис. 2.

Генератор ИГЛА-ЗВ собран в металлическом корпусе с габаритами

585x440x530 мм. На рис. 3 показан генератор ИГЛА-ЗВ со снятой верхней крышкой, а на рис. 4 – передняя панель генератора ИГЛА-ЗВ.



Рисунок 1 – Общий вид генератора ИГЛА-ЗВ

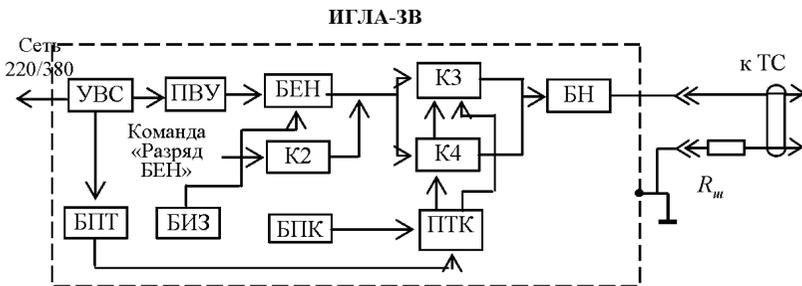


Рисунок 2 – Блок-схема установки Г-ИГЛА-ЗВ: УВС – узел ввода сетевого напряжения; ПВУ – повысительно-выпрямительное устройство; БЕН – блок емкостных накопителей; К2, К3, К4 – коммутаторы; БН – блок нагрузок; ПТК – программируемый таймер-коммутатор; БПТ – блок питания ПТК; БИЗ – блок измерения зарядного напряжения; БПК – блок питания коммутаторов;  $R_{ш}$  – шунт штатный выносной

На передней панели генератора ИГЛА-ЗВ расположены следующие органы управления и контроля генератора:

- клавиша СЕТЬ, служит для подачи напряжения питания 220 В 50 Гц на генератор ИГЛА-ЗВ и отключения после окончания работы;
- регулятор РЕГУЛИРОВКА  $U_{зар}$ , служит для плавного изменения зарядного напряжения;
- стрелочный вольтметр PV1 ( $U_{зар}$ ), показывает величину требуемого постоянного зарядного напряжения на конденсаторе БЕН;
- переключатель ПОЛЯРНОСТЬ служит для выбора полярности выходных импульсов напряжения и тока:

- а) положение «+» – одиночные импульсы положительной полярности;
- б) положение «-» – одиночные импульсы отрицательной полярности;
- в) среднее положение «0».

– переключатель ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ – «1», «2», «3», «4» и «5» служит для выбора требуемого уровня испытаний выходной волны напряжения и тока:

– ТАБЛО ПТК служит для отображения параметров циклограмм работы генератора ИГЛА-3В;

– кнопки «↑» и «↓» служат для изменения количества выходных импульсов (КОЛ ИМП) и интервала между импульсами (ИНТЕРВ);

– кнопка СТАРТ/СТОП служит для запуска и остановки генератора ИГЛА-3В.



Рисунок 3 – ИГЛА-3В со снятой верхней крышкой



Рисунок 4 – Передняя панель ИГЛА-3В

На задней панели генератора ИГЛА-3В расположены следующие элементы:

– разъемы Выходы, « $U_4$ » и « $I_{5,4}$ », которые служат для подключения к генератору ИГЛА-3В изделия для его испытания в режимах:

- а) испытательным напряжением формы 4 – выход « $U_4$ »;
- б) испытательным током формы 5А – выход « $I_{5,4}$ ».

К этим же выходам подключаются высокоомный делитель напряжения Р6015А фирмы Tektronix – для измерения напряжения на выходе генератора ИГЛА-3В в режиме холостого хода генератора или шунт штатный выносной  $R_{ш}$  – для измерения токов короткого замыкания генератора ИГЛА-3В;

– разъем СЕТЬ 220 В служит для подключения к Г-ИГЛА-3В сетевого кабеля;

– клемма  $\perp$  служит для подключения ИГЛА-3В к контуру заземления.

При проведении предварительных испытаний генератора ИГЛА-3В и его первичной аттестации были получены испытательные (выходные) напряжения формы 4 (рис. 5) и испытательные (выходные) токи формы 5А (рис. 6).

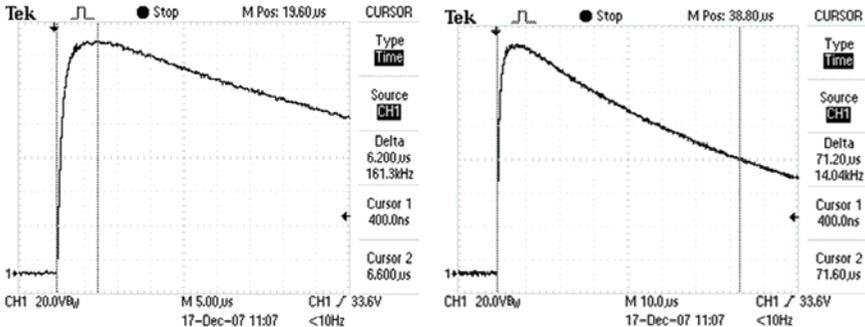


Рисунок 5 – Тест-осциллограмма импульса испытательного напряжения формы « $U_4$ » (фронт – 6,2 мкс и спад – 71,2 мкс)

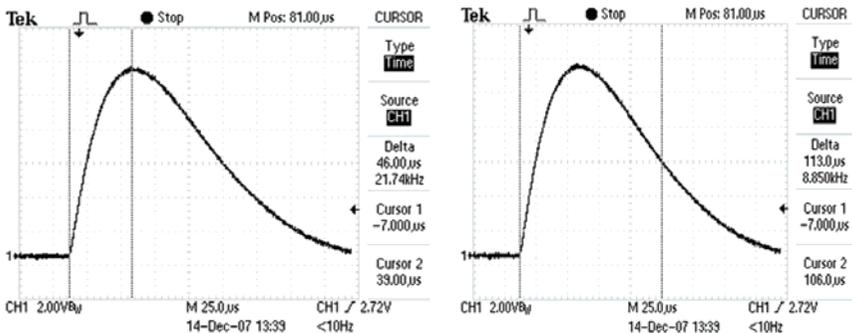


Рисунок 6 – Тест-осциллограмма импульса испытательного тока формы « $I_{5,4}$ » (фронт – 46 мкс и спад – 113 мкс)

Как видно из этих осциллограмм амплитудно-временные параметры

(АВП) испытательных напряжений и токов полностью соответствуют АВП по табл. 1 с учетом допусков.

При испытаниях БАО на молниестойкость методом «ввода в заземление» различают два вида испытаний:

– испытание напряжением формы 4, которое подается между корпусом БАО и землей – штатное заземление при этом разрывается, и происходит подскок потенциала корпуса БАО относительно «земли» (рис. 7);

– испытание током формы 5А, который подается в цепь заземления БАО (рис. 8). Для того, чтобы этот ток был постоянным независимо от формы и параметров заземлителя БАО, в генераторе предусмотрен штатный заземлитель как часть разрядного контура генератора, через который и заземляется корпус БАО.

Схема испытаний БАО напряжением « $U_4$ » приведена на рис. 7 (в соответствии с рисунком 22-13 КТ- 160D).

Схема испытаний бортового оборудования летательных аппаратов БАО током « $I_{5A}$ » приведена на рис. 8 (в соответствии с рисунком 22-13 КТ- 160D).

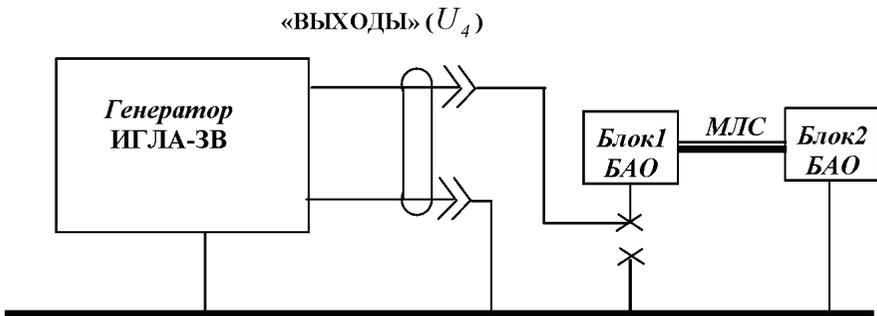


Рисунок 7 – Схема испытаний БАО в режиме « $U_4$ »

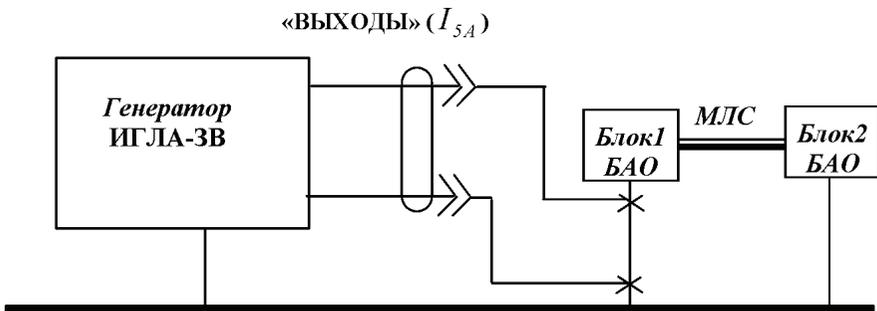


Рисунок 8 – Схема испытаний БАО в режиме « $I_{5A}$ »

При испытаниях БАО тем или другим видом испытаний переключатели на передней панели генератора необходимо установить в такие положения, чтобы обеспечить необходимую циклограмму испытаний, а именно: установить форму и полярность испытательного импульса, количество испытательных импульсов (не менее 10) и интервал между импульсами, который выбирается таким образом, чтобы за межимпульсный интервал провести проверку работоспособности БАО после каждого нагружения.

**Выводы.** Генератор ИГЛА-ЗВ прошел государственную аттестацию и успешно применяется в Испытательной лаборатории НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» для проведения испытаний БАО на молниестойкость методом «ВВОДА В ЗАЗЕМЛЕНИЕ».

**Список литературы:** 1. КТ 160D. 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.

*Поступила в редколлегию 10.09.2013*

УДК 621.317.3

**Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («ВВОД В ЗАЗЕМЛЕНИЕ»)** / Ю. С. Немченко, В. В. Князев, И. П. Лесной, С. Б. Сомхив, Т. Н. Островерх // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПИ», 2013. – № 60 (1033). – С. 76-82. – Бібліогр.: 1 назв.

Описано конструкцію та результати атестації генератора, призначеного для випробувань бортового авіаційного обладнання на сприйнятливість до перехідних процесів, викликаним блискавкою, відповідно до вимог міжнародних стандартів. Генератор виробляє імпульси напруги та струму форм 4 та 5А по п'ятих рівнях іспитів, випробування проводяться методом «введення в уземлення».

**Ключові слова:** випробування, бортове обладнання, несприйнятливість, блискавка, перехідні процеси, генератор, атестація.

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/burst, caused lightning, according to of International Standards are described. The apparatus generates the test voltage and current of the forms 4 and 5A on five levels tests are conducted by of method «input into grounding».

**Keywords:** test, board aircraft equipment, immunity, lightning, fast transient burst, generator, attestation.

**Ю. С. НЕМЧЕНКО**, гл. метролог, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;  
**В. В. КНЯЗЕВ**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НИПКИ «Молния»  
НТУ «ХПИ»;  
**И. П. ЛЕСНОЙ**, зав. лаб., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;  
**С. Б. СОМХИЕВ**, вед. инженер, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;  
**И. А. ПОСТЕЛЬНИК**, инженер, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

## **ГЕНЕРАТОР ГКП-150М ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К КОНДУКТИВНЫМ ПОМЕХАМ В ПОЛОСЕ ЧАСТОТ ОТ 15 ГЦ ДО 150 КГЦ**

Описана конструкция и результаты аттестации генератора ГКП-150, предназначенного для испытания технических средств на невосприимчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц в соответствии с действующими в Украине стандартами. Генератор вырабатывает кондуктивные помехи вида «переменные напряжения в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц».

**Ключевые слова:** испытания, невосприимчивость, кондуктивные помехи, генератор, аттестация

**Введение.** Различают низкочастотные кондуктивные помехи (КП) трех видов:

- КП постоянного тока;
- КП переменного тока частотой 50 Гц;
- КП в диапазоне частот от 15 Гц до 150 кГц.

Эти виды КП были реализованы в установке У-КП-150 [1]. Опыт эксплуатации установки У-КП-150 показал, что генератор первых двух видов КП (Г-КП-ППТ) не требует коррекции. Опыт эксплуатации генератора Г-КП-150 из состава установки У-КП-150 такую коррекцию требует, так как не позволяет подавать выходное напряжение непрерывно (оно состоит из 4 независимых фрагментов, интервал между подачей которых может составлять до 30 с). В данной статье рассматриваются новая версия генератора ГКП-150М. Генератор ГКП-150М по своим выходным параметрам идентичен установке У-КП-150, но является более универсальным и удобным для проведения испытаний на стойкость к КП.

КП третьего вида представляют собой общие несимметричные напряжения в полосе частот от 15 до 150 кГц, которые наводятся внешними электрическими полями в электронных технических средствах (ТС). Основными источниками этих полей являются силовые распределительные системы и силовое электронное оборудование, которое может инжектировать помехи в линии электропитания и в системы заземления, а также в сигнальные линии и

линии управления ТС. Поэтому все такого рода ТС обязательно проходят испытания в лабораторных условиях по гармонизированному в Украине международному стандарту ДСТУ ІЕС 61000-4-16:2007 [2].

Циклограмма и амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) испытательных сигналов приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Из их рассмотрения вытекает, что циклограмма испытательных сигналов содержит 4 фрагмента, каждый из которых длится 100 с, а диапазон частот в этом фрагменте составляет 1 декаду. Кроме того, в 1 и 3 фрагментах также 1 декаду составляет изменение испытательного напряжения, а во 2 и 4 фрагментах – это напряжение постоянно.

Таблица 1 – АЧХ испытательных сигналов кондуктивных помех в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц

Степень жесткости испытаний	Испытательное напряжение $U_{исп}$ , В, в полосе частот			
	15 – 150 Гц	150 Гц – 1,5 кГц	1,5 – 15 кГц	15 – 150 кГц
1	1 – 0,1	0,1	0,1 – 1	1
2	3 – 0,3	0,3	0,3 – 3	3
3	10 – 1	1	1 – 10	10
4	30 – 3	3	3 – 30	30

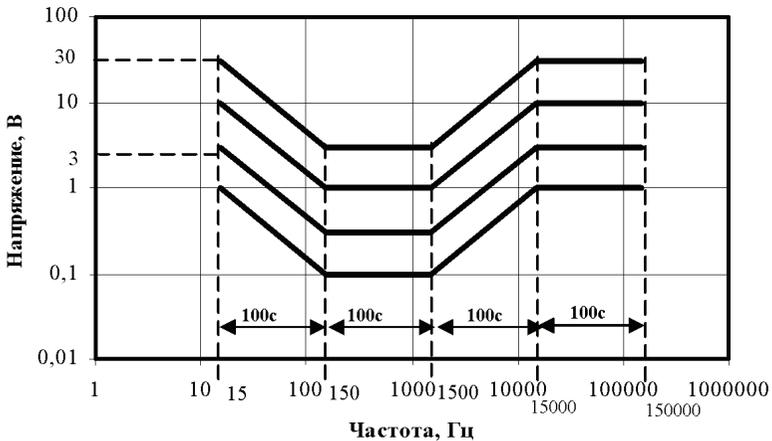


Рисунок 1 – Циклограмма испытательных сигналов кондуктивных помех в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц

**Основные результаты.** Ранее для реализации требований стандарта ДСТУ ІЕС 61000-4-16:2007 была создана испытательная установка У-КП-150. В этой установке формирование циклограммы испытательного сигнала производилось при помощи внешнего генератора синусоидальных сигналов RIGOL DG3121A, который задавал при одном и том же выходном напряжении отдельные по частоте фрагменты циклограммы, приведенной на

рис. 1, а построение самой циклограммы по напряжению производилось в генераторе ГКП-150М. Такая конструкция генератора имеет существенный недостаток, поскольку, процесс испытаний необходимо было прерывать 3 раза для того, чтобы на генераторе RIGOL DG3121A установить новые значения начальных и конечных частот нужного фрагмента циклограммы, а также произвести необходимые переключения на передней панели самого генератора.

Ниже описан генератор ГКП-150М (рис. 2), нового поколения, который лишен этого недостатка. Основные конструктивно-эксплуатационные характеристики генератора ГКП-150М приведены в табл. 2.



Рисунок 2 – Общий вид генератора ГКП-150М

Таблица 2 – Основные конструктивно-эксплуатационные характеристики генератора Г-КП-150М

Наименование характеристики	Размерность	Значение
Напряжение питания генератора ГКП-150М	В Гц	220 50
Потребляемая мощность, не более	В А	65
Время готовности генератора к использованию, не более	мин	15
Время непрерывной работы, не более	час	8
Габаритные размеры генератора ГКП-150М	мм	455x350x200
Масса генератора ГКП-150М	кг	8

Блок схема генератора ГКП-150М приведена на рис. 3.

Исходя из этой схемы, генератор ГКП-150М может работать в двух режимах:

– в режиме работы с внутренним генератором синусоидальных напря-

жений ГКП-150МВ;

– в режиме работы с внешним генератором синусоидальных напряжений, например, генератором RIGOL DG3121A, ГКП-150MR, то есть этот режим работы идентичен режиму работы генератора ГКП-150 и подробно описан в [3].

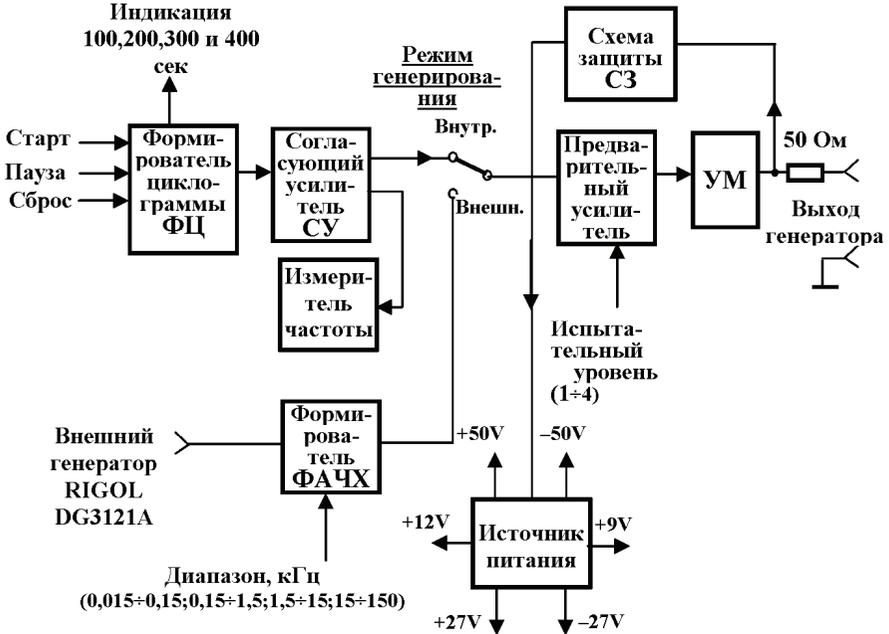


Рисунок 3 – Блок-схема генератора ГКП-150М

На передней панели генератора ГКП-150М расположены следующие органы управления и контроля:

– клавиша СЕТЬ с подсветкой служит для подачи напряжения питания 220 В 50 Гц на генератор ГКП-150М и для его отключения после окончания работы;

– тумблер РЕЖИМ ГЕНЕР. (внутр. или внешн.) служит для переключения режимов работы генератора ГКП-150МВ или ГКП-150MR;

– переключатель ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ служит для установления уровня испытательного напряжения генератора ГКП-150М и имеет четыре положения: «1», «2», «3», «4»;

– светодиод ГОТОВ индицирует готовность генератора к работе;

– кнопка СТАРТ служит для запуска генератора в режиме ГКП-150МВ;

– индикатор ЧАСТОТА, Гц служит для текущей индикации частоты выходного напряжения в режиме ГКП-150МВ;

– светодиоды ИНДИКАЦИЯ  $T_{\text{цикла}}$ , сек (100,200,300 или 400 сек) служат для указания фрагмента циклограммы испытательного напряжения по рис. 1 в режиме ГКП-150МВ;

– кнопка ПАУЗА служит для остановки работы генератора в любом месте циклограммы испытательного напряжения. При повторном нажатии кнопки генератор продолжает свою работу с места паузы и до конца циклограммы;

– кнопка СБРОС служит для возврата генератора в начало генерирования циклограммы;

– светодиод ПАУЗА индицирует остановку работы генератора;

разъем ВНЕШН. ГЕНЕР. (~ 3,7 В) служит для подключения к генератору Г-КП-150М внешнего генератора RIGOL DG3121A;

– переключатель ДИАПАЗОН, Гц служит для установления фрагмента циклограммы испытательного напряжения по рис. 1 в режиме ГКП-150MR;

– светодиоды ЗАЩИТА индицируют аварийную перегрузку генератора в процессе его работы.

На задней панели генератора ГКП-150М находится разъем ВЫХОД для подключения к генератору ГКП-150М к испытываемому ТС.

Работа генератора в режиме ГКП-150МВ формируется цепочкой составных частей (ФЦ+СУ+ПУ+УМ).

Работа генератора в режиме ГКП-150MR формируется цепочкой составных частей (ВГ+ФАЧХ+ПУ+УМ).

В новом генераторе ГКП-150М использованы блоки ранее применявшиеся в генераторе ГКП-150 (ПУ+УМ+ФАЧХ), а также вновь разработанные блоки ФЦ и СУ.

Необходимость наличия двух режимов будет обоснована ниже.

В режиме ГКП-150МВ схема работает следующим образом, для чего переключатель РЕЖИМ ГЕНЕРИР. переводится в положение ВНУТР.

В цифровом модуле ФЦ (формирователь циклограммы) формируется АЧХ выходного сигнала генератора по рис. 1. Выходной сигнал содержит 4 фрагмента, длительность каждого составляет 100 секунд и диапазон частот в 1 декаду. Каждый фрагмент разбит на 100 точек с одинаковым шагом в каждом фрагменте, то есть величина шага в каждом фрагменте отличается в 10 раз от предыдущего. Однако, напряжение с выхода ФЦ значительно меньше как по напряжению (до 30 В), так и по мощности (до 20 Вт), чем требуется для проведения испытаний. Поэтому, на выходе модулем ФЦ включены предварительный усилитель (модуль ПУ) и усилитель мощности (УМ), обеспечивающие необходимые параметры выходного сигнала. Для удобства контроля за течением циклограммы испытательного напряжения служат измеритель текущей частоты и 4 светодиодных индикатора по одному на каждый фрагмент.

ФЦ состоит из синтезатора частоты DD1 с кварцевым генератором DD2 и микроконтроллера DD3 с резистивной матрицей, а также стабилизатора

напряжения питания +3,3V DA1 (рис. 4)

Принцип работы ФЦ построен на использовании программно управляемого DDS синтезатора частоты фирмы Analog Devices - AD9832 (рис. 5). Данный синтезатор позволяет генерировать сигнал синусоидальной формы с частотой от 0 Гц до 25МГц. 32-битный фазовый аккумулятор дает возможность получить выходной сигнал с точностью до 0,01 Гц, при максимальном тактирующем сигнале в 25,0 МГц. На выходе синтезатора стоит интегрированный 10-битный ЦАП. Вход опорного напряжения ЦАП позволять управлять амплитудой выходного сигнала. Синтезатор AD9832 имеет отличное соотношение сигнал/шум без применения какой-либо фильтрации ~ 60dB.

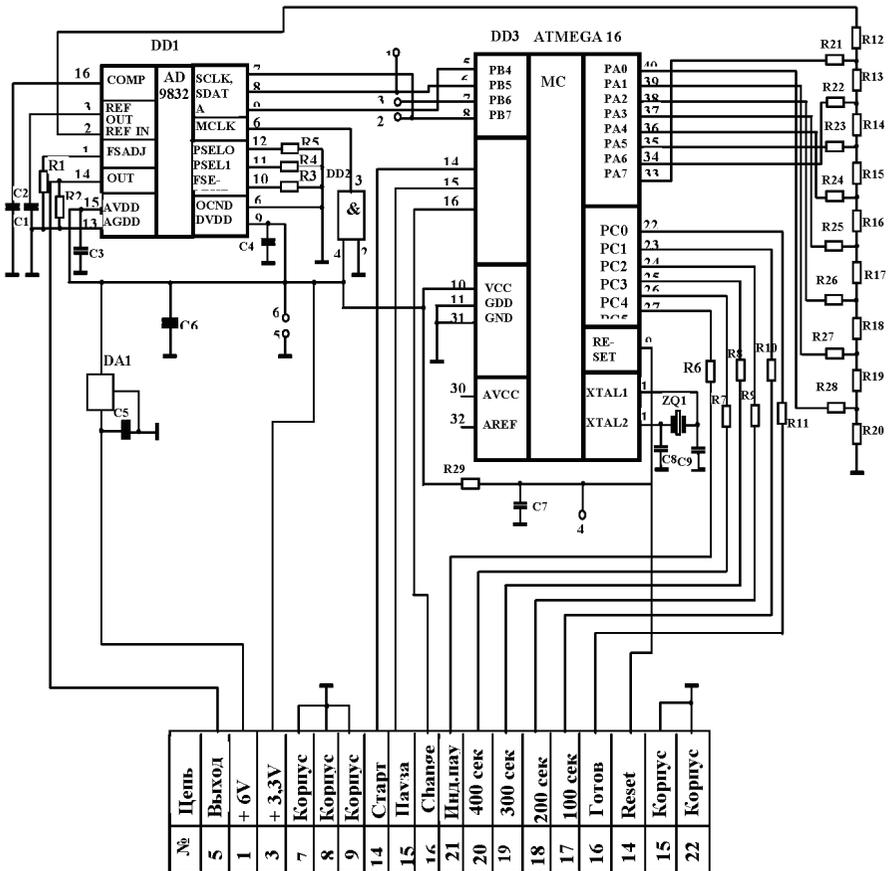


Рисунок 4 – Схема электрическая принципиальная ФЦ

Управление частотой выходного сигнала синтезатора реализовано на базе микроконтроллера (МК) ATmega16 фирмы ATMEL. Программируется

AD9832 по последовательному интерфейсу SPI. Для задания амплитуды выходного сигнала используется вход опорного напряжения (REFin) встроенного ЦАП. На выходе резистивной матрицы с помощью DDS синтезатора, выполненного на МК ATmega16, формируется опорное напряжение (Uref) и подается на вход REFin микросхемы AD9832. МК также позволяет реализовать управление и индикацию работы блока ФЦ. Программа для МК написана на языке C и откомпилирована с помощью ПО AVRStudio 4.0. В итоге на выходе блока ФЦ мы получили сигнал изменяющийся по частоте, в соответствии с рис. 1, и с выходным напряжением, которое значительно меньше, чем требуется по рис. 1. Поэтому этот выходной сигнал требует дополнительно усиления по напряжению. Для этой цели служат согласующий усилитель СУ и усилитель мощности УМ.

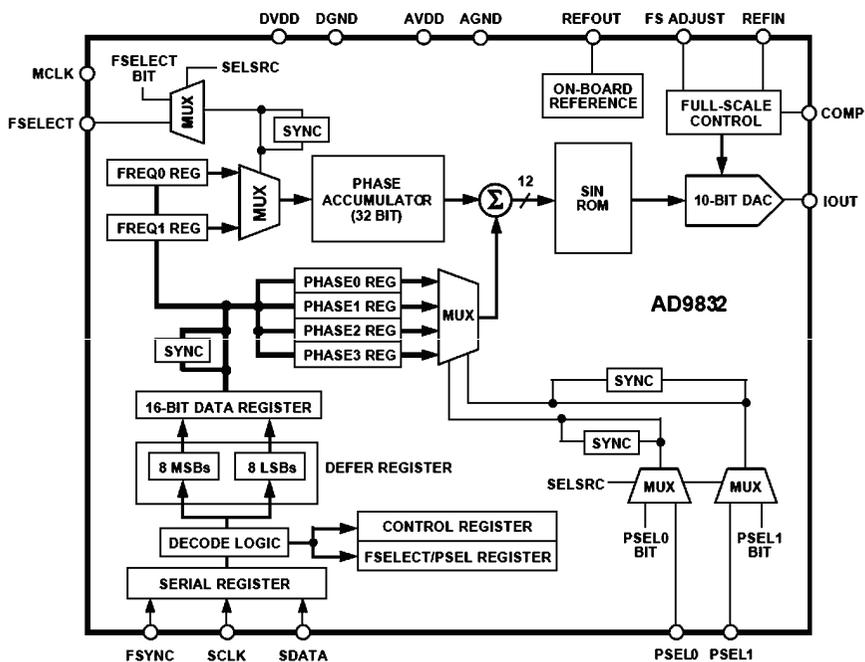


Рисунок 5 – Схема функциональная синтезатора AD9832/

На выходе УМ циклограмма испытательного напряжения полностью соответствует рис. 1 как по напряжению, так и по частоте, а необходимый испытательный уровень выбирается переключателем ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ.

В исходном состоянии на передней панели генератора индицируется «Готов». При нажатии кнопки «Старт» на 14 вывод микросхемы DD3 подается импульс, запускающий рабочий цикл схемы. При этом светодиод «Го-

тов» мигает. В процессе работы формирователь можно остановить в любой момент цикла нажатием кнопки «Пауза». При этом светодиодом индицируется ее включение, а светодиод «Готов» гаснет. При повторном нажатии кнопки «Пауза» сигнал продолжает изменяться с того момента, где была остановка. При этом «Пауза» гаснет, а «Готов» продолжает мигать.

В процессе прохождения цикла DD3 вырабатывает сигналы, индицируемые светодиодами «100 сек», «200 сек», «300 сек» и «400 сек». По прошествии времени всего цикла длительностью 400 сек формирование синусоидального сигнала прекращается, и светятся все светодиоды 100, 200, 300 и 400 сек, а светодиод «Готов» гаснет. Возврат схемы в исходное состояние производится нажатием кнопки «Сброс».

Методика проведения испытаний ТС с помощью генератора ГКП-150М заключается в нагружении линий связи или линий питания ТС кондуктивными помехами или непосредственно путем подачи испытательного напряжения между началом и концом экрана данного кабеля (рис. 6), или через устройство ввода помехи УВП-О (однофазное), или УВП-Т (трехфазное) (рис. 7). Кондуктивная связь между этими элементами испытательной схемы осуществляется через резистор 50 Ом, который встроен в генератор.

Для сопряжения генератора ГКП-150 М с ТС служит набор штатных кабелей СК-1 – СК-3 и К-ЭК.

В начале испытаний генератор ГКП-150 работает в режиме ГКП-150-МВ, непрерывно генерируя в течение 400 с циклограмму по рис. 1. При этом также непрерывно должна работать контрольно-проверочная аппаратура (КПА) ТС, постоянно контролируя и запоминая режимы работы ТС, а также отмечая все случаи отклонения режимов работы ТС от нормы.

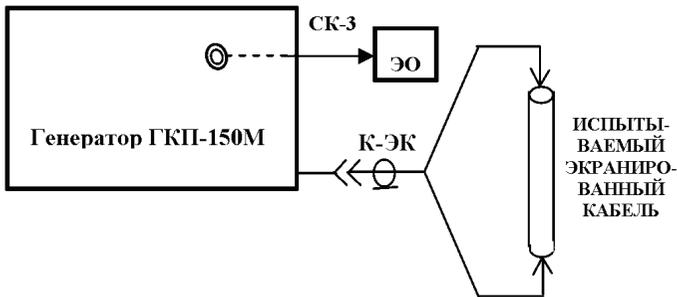


Рисунок 6 – Схема испытаний экранированных кабелей путем подачи переменного напряжения в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц на экран кабеля

После завершения циклограммы испытания просматривают запись работы ТС, отдельно выделяя частоты, на которых произошли отклонения режимов работы ТС от нормы. После этого генератор ГКП-150М переводится в режим ГКП-15-MR. На генераторе RIGOL DG3121A устанавливается первая частота нарушения работы и подтверждается это нарушение работы ТС, по-

сле чего в ручном режиме частота генератора плавно изменяется в обе стороны с целью выявления диапазона частот нарушения работы ТС. Такие манипуляции прodelываются на всех частотах нарушения работы ТС, зафиксированные КПА. Эта информация необходима конструкторам ТС для принятия эффективных мер для устранения нарушений работы ТС.

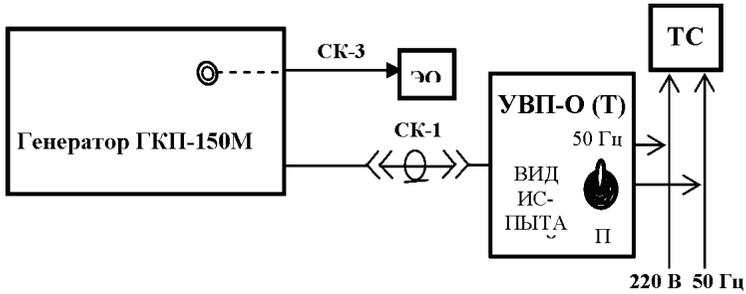


Рисунок 7 – Схема испытаний однофазных (трехфазных) портов питания ТС кондуктивными помехами переменного напряжения в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц в режиме ГКП-150МВ

На рис. 8 приведены три линии, две из которых (верхняя и нижняя) представляют собой нормы по табл. 1 с учетом допусков ( $\pm 10\%$ ), а внутренняя линия – это результаты экспериментальных данных выходных напряжений, полученные при аттестации. Из этих графиков видно, что выходные напряжения генератора ГКП-150М полностью удовлетворяют стандарта [2].

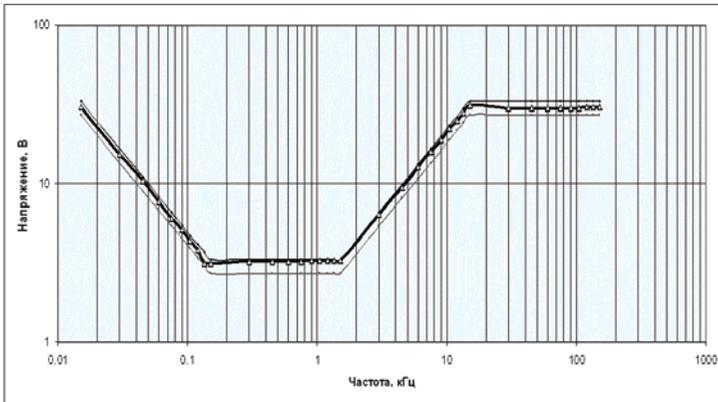


Рисунок 8 – Экспериментальная циклограмма испытательного напряжения для 4 испытательного уровня в частотном диапазоне от 0,015 кГц до 150 кГц

Генератор ГКП-150М успешно прошел государственную аттестацию, результаты которой приведены на рис. 9-12.

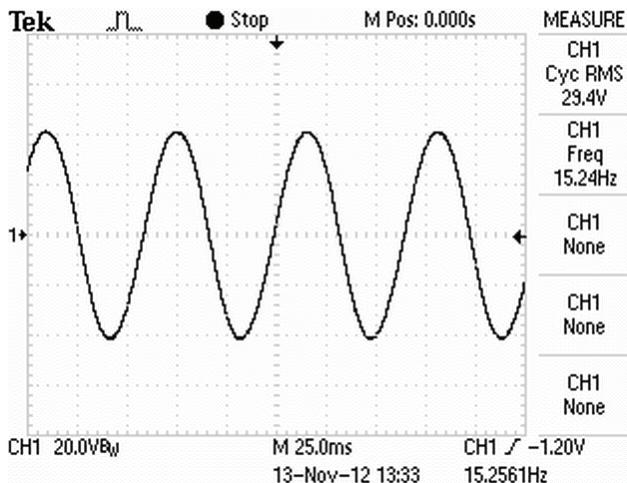


Рисунок 9 – Типовая осциллограмма выходного напряжения в начале 1 фрагмента циклограммы

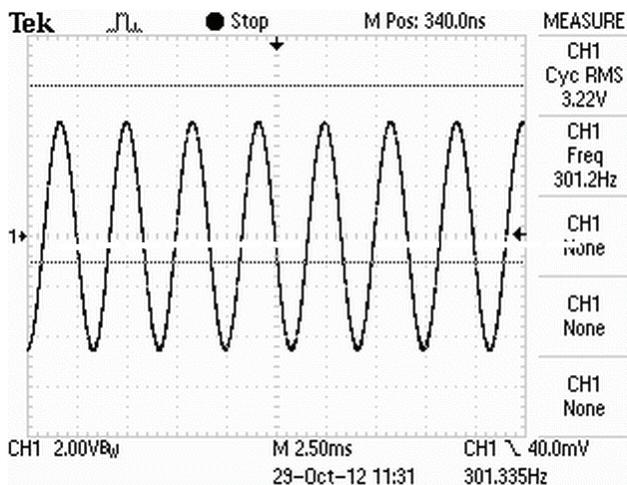


Рисунок 10 – Типовая осциллограмма выходного напряжения в середине 2 фрагмента циклограммы

**Выводы.** Генератор ГКП-150М прошел государственную аттестацию и успешно применяется в Испытательной лаборатории НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» для проведения испытаний технических средств на устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц.

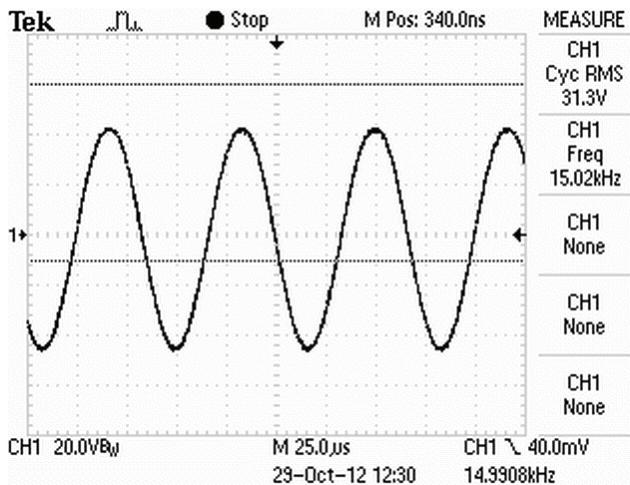


Рисунок 11 – Типовая осциллограмма выходного напряжения в конце 3 фрагмента циклограммы

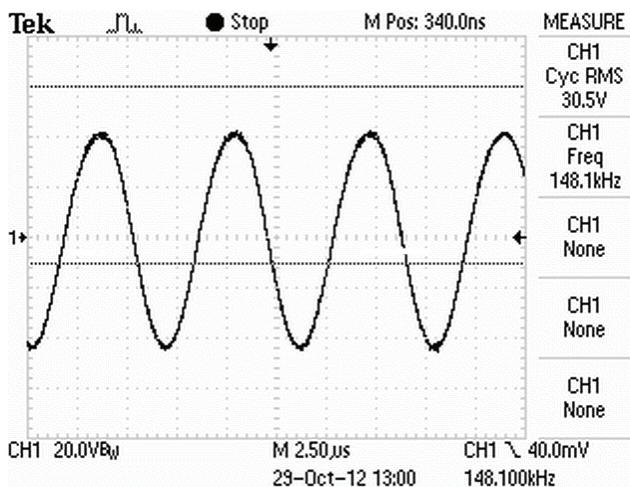


Рисунок 12 – Типовая осциллограмма выходного напряжения в конце 4 фрагмента циклограммы

**Список литературы:** 1. Установка У-КП-150 для испытаний технических средств на устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 Гц до 150 кГц / *Князев В.В., Немченко Ю.С., Лесной И.П., Сомхив С.Б., Островерх Т.Н.* // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2009. – № 39. – С. 85-93. 2. IEC 61000-4-16:2007 Електромагнітна сумісність. Частина 4-16. Методи випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливість до кондуктивних несиметричних завод у діапазоні частот від 0 Гц до 150 кГц. 3. Установка У-КП-150 для испытаний технических средств на устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 Гц до 150 кГц. Руководство по эксплуатации У-КП-150.000.000.000 РЭ.

Поступила в редколлегию 17.09.2013

УДК 621.317.3

**Генератор ГКП-150М для испытаний технических средств на невосприимчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц / Ю. С. Немченко, В. В. Князев, И. П. Лесной, С. Б. Сомхив, И. А. Постельник // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 83-94. – Бібліогр.: 6 назв.**

Описано конструкцію і результати атестації генератора ГКП-150М, призначеного для випробувань технічних засобів на стійкість до кондуктивним завад у смузі частот від 15 Гц до 150 кГц згідно з діючими в Україні стандартами. Генератор генерує кондуктивні завади виду «перемінні напруги в смузі частот від 15 Гц до 150 кГц».

**Ключові слова:** випробування, несприйнятливість, кондуктивна завада, генератор, атестація.

The design and results to qualifications of the generator GKP-150M, intended for test the technical facilities for immunity to conducted, common mode disturbances in frequency range from 0 Hz to 150 kHz in accordance with acting in Ukraine Standard, are described. Generator generates the conducted common mode disturbances of the type «variable voltages in frequency range from 15 Hz to 150 kHz».

**Keywords:** test, immunity, conducted common mode disturbance, generator, attestation.

УДК 621.391

**В. М. ПОШТАРЕНКО**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ»;  
**А. Ю. АНДРЕЕВ**, магістр, НТУ «ХПІ»;  
**МЕРСНИ АМАЛЬ**, аспірант, НТУ «ХПІ»

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ НА КРИТИЧЕСКИХ УЧАСТКАХ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ**

Обеспечение качества обслуживания имеет большое значение в современных телекоммуникационных сетях. Важным также становится обеспечить гарантированное QoS в транспортной сети. Предлагается методика обеспечения QoS в MPLS-сетях с использованием технологий балансировки и прогнозирования трафика.

**Ключевые слова:** качество обслуживания, транспортная сеть, прогнозирование трафика.

Основой современных информационно-телекоммуникационных сетей являются мультисервисные сети. Как показывают исследования процессов в различных системах передачи данных, основанных на мультисервисных сетях [4, 5], физическое выведение из строя каналов связи приводит к уменьшению общей пропускной способности, но не только за счет потери каналов

© В. М. Поштаренко, А. Ю. Андреев, Мерсни Амаль, 2013

связи. Изменение структуры сети влечет за собой рост объемов служебной информации, направленной на обеспечение функционирования системы передачи данных, а следовательно к уменьшению доли вычислительного ресурса элементов сети, направленного на выполнение основной функции – передачи данных. Кроме того, увеличение объема интегральных потоков данных (объединенных информационных потоков различных форматов, направленных от одного источника к одному получателю) и уменьшение пропускной способности сети может приводить к качественному изменению статистических характеристик самих потоков, что не укладывается в общепринятые модели и не учитывается в существующих информационных технологиях, на основе которых разработаны методы и средства управления сетевыми процессами.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования процессов обмена информацией в сети [5], трафик интегральных потоков данных обладает структурой, не позволяющей использовать при проектировании привычные методы, основанные на пуассоновских моделях и формулах Эрланга [6]. Особенности трафика сети проявляются в его специфическом профиле, определяющим фрактальный характер соответствующих процессов: в реализации всегда присутствует некоторое количество достаточно сильных выбросов на фоне относительно низкого среднего уровня, т.е. увеличивается коэффициент отклонения пиковых значений интенсивности информационного потока, определяемый выражением [6]:

$$k = \lambda_{\max} / \lambda_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\max}$  – максимальное значение интенсивности информационного потока;  $\lambda_{\text{ср}}$  – среднее значение интенсивности информационного потока.

Описанное явление значительно ухудшает характеристики (увеличивает потери пакетов, время задержек) при прохождении трафика даже в случаях, когда средняя интенсивность трафика намного ниже потенциально достижимой скорости передачи в данном канале.

К настоящему времени показано, что такой структурой обладает трафик в информационно-телекоммуникационных сетях при работе широко распространенных протоколов Ethernet, LAN, WAN, TCP при передаче сжатого видео, WWW – трафика и пр. Также обнаружены аналогичные эффекты в сотовых телефонных сетях с коммутацией пакетов и в каналах беспроводной связи [5].

Управление мультисервисной сетью предполагает использование системных методов и алгоритмов управления трафиком (TE, traffic engineering), связанных с оптимизацией рабочих характеристик сетей и включающих технологию и научные принципы измерения, моделирования, описания и управления трафиком для получения требуемых рабочих характеристик [3]. TE включает набор взаимосвязанных сетевых элементов, систему мониторинга состояния сети, и набор средств управления конфигурацией как отклик на текущее состояние сети, и позволяет превентивно, используя прогнозирова-

ние состояния и тенденций развития трафика, предпринимать действия, предотвращающие нежелательные будущие состояния. ТЕ ориентировано на минимизацию потерь пакетов и задержек, оптимизацию пропускной способности и согласование наилучшего уровня услуг. Полоса пропускания является критическим ресурсом современных мультисервисных сетей. Следовательно, центральной функцией ТЕ является эффективное управление пропускной способностью. Большинство из них предполагает возможность внешней параметризации, то есть передачи параметров трафика непосредственно используемым алгоритмам управления. Некоторые из методов, как, например, метод мультипротокольной коммутации пакетов по меткам (MPLS), позволяющий инкапсулировать различные протоколы передачи данных и независимый от каких-либо протоколов механизмов передачи данных, допускают модификацию или замену алгоритмов управления, входящих в реализуемую технологию управления. Исходя из вышесказанного и в соответствии с рассмотренной во втором разделе схемой взаимодействия программных средств при обработке запросов в телекоммуникационной сети (рис. 1) была предложена информационная технология управления интегральными потоками трафика.

Нижний уровень управления предполагает использование алгоритмов управления ТЕ, в которые будут передаваться оценки параметров сети, полученные при помощи методов, учитывающих характерные особенности мультисервисных сетей.

Для получения оценок параметров сети предлагается использовать следующие методы:

- метод оценки размеров буферов фильтрации коммуникационного оборудования, позволяющий повысить пропускную способность виртуальных каналов за счет уменьшения задержки, вызываемой подтверждениями о передаче пакетов, ожидающими в очередях коммуникационного оборудования путем выбора оптимального размера буферов фильтрации для интегральных потоков данных, обслуживаемых виртуальным каналом;

- метод синтеза устойчивой оценки функции плотности распределения трафика, создаваемого интегральным потоком данных, который позволяет получить в случае фрактального характера трафика оценки параметров управления более адекватные реальным, чем в аналогичных методах;

- метод оценки отклонения трафика сети с долговременной зависимостью от стационарного режима, позволяющий уточнить оценки параметров, связанных с характеристиками выбросов;

- метод оперативной идентификации параметров трафика мультисервисной сети, предполагающий построение аппроксимирующего вейвлета по выбранному ортогональному базису на основе агрегирования отсчетов различных масштабов, что позволило с применением асимптотического свойства самоподобия трафика при агрегировании провести количественную оценку границ изменения масштабных и частотных свойств трафика.

– методы управления перераспределением пропускной способности виртуального соединения с учетом приоритетов и конкуренции между интегральными потоками данных при динамическом резервировании пропускной способности;

– метод определения профиля нагрузки звена информационно-телекоммуникационных сети, который на основе анализ пропускной способности звена и расчета статистических характеристик обслуживаемых интегральных потоков данных позволяет рассчитать профиль нагрузки при заданных требованиях к качеству обслуживания;

– метод прогнозирования фрактального трафика, использующий оценки статистических характеристик второго порядка и свойство масштабной инвариантности трафика, позволяющий на основе данных об отсчетах, полученных до фиксированного момента времени  $t_n$ , получить оценки отсчетов и возможного числа сингулярностей в поведении трафика на интервале прогнозирования  $(t_n, t_n+k)$  при выборе кратномасштабных коэффициентов корреляции отсчетов;

– метод динамического управления распределением нагрузки виртуальных соединений, обеспечивающих прохождение сети, учитывающий при прогнозировании фрактальный характер создаваемого трафика.



Рисунок 1 – Информационная технология управления

В результате воздействия внешних факторов в информационно-телекоммуникационных сетях возможен выход из строя большого количества каналов связи и коммутационных центров, что приводит к изменению структуры сети передачи данных, возникновению перегрузок и снижению оперативности передачи мультисервисной сети. Особенно заметно снижение оперативности на образуемых «узких местах» сети (то есть на трактах передачи данных, которые в топологии сети представляются ребром типа «мост»), представляющих критические участки сети. Здесь трафик на входе участка приобретает ярко выраженный фрактальный характер, что не учитывается стандартными методами ТЕ при борьбе с перегрузками.

Для анализа качества предложенного метода управления пропускной способностью «узкого места» было проведено моделирование с использованием средства моделирования OPNET Modeler [2]. Были промоделированы топологии сети с несколькими (рис. 2) узкими местами при использовании предиктора на основе метода наименьших квадратов для оценки достижимой производительности. На «узких местах» устанавливались  $N$  соединений TCP, генерирующие трафик с различными требованиями к качеству обслуживания (трафик BestEffort и Interactive Multimedia – AF43).

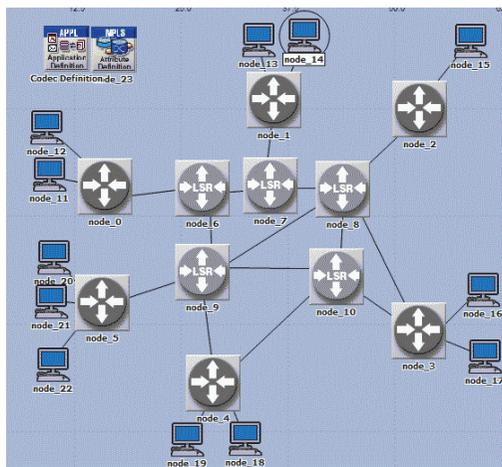


Рисунок 2 – Топология сети в OPNET Modeler

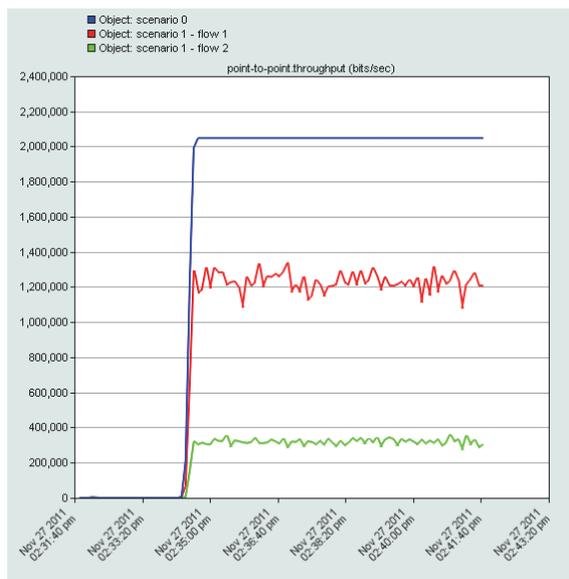


Рисунок 3 – Производительность сети без использования предложенного метода (scenario 0) и с использованием предложенного метода (scenario 1)

Результаты экспериментов обобщены на графиках, показывающих достигнутую производительность, а также задержки передачи в сети для различных сценариев (без использования предложенного метода и с использованием) (рис. 3 и 4).

Таким образом, при использовании стандартных средств мультисервис-

ной MPLS сети, критический участок связи перегружается, наблюдаются потери пакетов и постоянный рост задержек передачи. В таком случае, качество обслуживания, запрашиваемое приложениями, не обеспечивается. При использовании предложенного метода, выполняется балансировка нагрузки между несколькими участками сети на основе прогноза поведения трафика, что позволяет разгрузить критический участок и обеспечить выполнение показателей QoS.

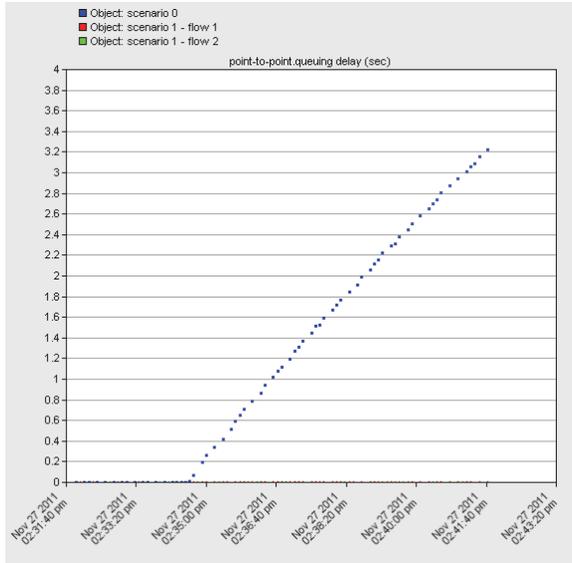


Рисунок 4 – Задержки в сети без использования предложенного метода (scenario 0) и с использованием предложенного метода (scenario 1)

**Список литературы:** 1. MPLS Fundamentals / Luc De Ghein. – Cisco Press, 2006. – 672 p. 2. Panwar Li Y. On the Performance of MPLS TE Queues for QoS Routing / Li Y. Panwar, S. Liu C.J. // Simulation series. – 2004. – Vol. 36; part 3. – P. 170-174. 3. Кучук Г.А. Многошкальное вейвлет-моделирование трафика мультисервисных сетей / Г.А. Кучук, А.А. Можжев, А.А. Коваленко // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 6 (40). – С. 231-239. 4. Алгазинов, Е.К. Анализ и компьютерное моделирование информационных процессов и систем / Е.К. Алгазинов, А.А. Сирота. – М.: Диалог МИФИ, 2009. – 414 с. 5. Еришов В.А. Мультисервисные телекоммуникационные сети / В.А. Еришов, Н.А. Кузнецов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 432 с. 6. Крылов В.В. Теория телетрафика и ее приложения / В.В. Крылов, С.С. Самохвалова. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с. 7. Бородакий Ю.В. Эволюция информационных систем (современное состояние и перспективы) / Ю.В. Бородакий. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2011. – 368 с.

Поступила в редколлегию 28.10.2013

УДК 621.391

**Обеспечение качества обслуживания на критических участках мультисервисной сети / В.М. Поштаренко, А.Ю. Андреев, Мерсни Амаль // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 94-100. – Бібліогр.: 7 назв.**

Забезпечення якості обслуговування має велике значення у сучасних телекомунікаційних мережах. Важливим також стає забезпечення гарантованого QoS у транспортній мережі. Запропоновано методику забезпечення QoS в MPLS – мережах із використанням технологій балансування і прогнозування трафіку.

**Ключові слова:** якість обслуговування, транспортна мережа, прогнозування трафіку.

Quality of service is important in modern telecommunication networks. Therefore it should be guaranteed in the transport network. Method of ensuring quality of service in MPLS-networks is proposed in this paper, using load balancing and traffic forecast techniques.

**Key words:** quality of service, transport network, traffic forecast.

УДК 621.391

**С. И. ПРИХОДЬКО**, д-р техн. наук, профессор, УкрГАЖТ, Харьков;  
**А. С. ЖУЧЕНКО**, канд. техн. наук, доцент, УкрГАЖТ, Харьков;  
**А. С. ВОЛКОВ**, канд. техн. наук, ст. преп., УкрГАЖТ, Харьков;  
**Н. В. ПОЛЯНСКОВА**, магистрант, УкрГАЖТ, Харьков

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ СЕТЕЙ ОПЕРАТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА УКРАИНЫ**

Рассмотрены принципы построения систем коммутации цифровых сетей отделенческой оперативно-технологической связи. Предложена организация мостовых систем коммутации, объединяющих 2 Мбит/с потоки диспетчерских кругов в кольца нижнего и верхнего уровней. Определены основные функции цифровых мостовых систем коммутации. Разработана двухуровневая модель цифровой сети оперативно-технологической связи.

**Ключевые слова:** системы коммутации, двухуровневая модель, цифровая сеть связи.

**Введение.** Железнодорожная связь существенно отличается от привычной и знакомой нам в повседневной жизни телефонной связи. Она состоит из общетехнологической связи (ОбТС) и оперативно-технологической (ОТС), непосредственно связанной с процессами перевозки. Высокая скорость реагирования и оперативность принятия решения для железнодорожного транспорта – жизненно необходимые качества. А значит и организуемая связь должна быть высокоскоростной, надежной и бесперебойной. Преимуществом цифровых сетей ОТС является возможность организации коммутации каналов, обеспечивающей соединение между абонентами сети по коммутируемым каналам аналогично ОбТС, что позволяет организовать интегральную

© С. И. Приходько, А. С. Жученко, А. С. Волков, Н. В. Полянскова, 2013

сеть ОТС, объединяющую сети ОТС и ОбТС с использованием типичной аппаратуры ОбТС и обеспечением всех специфических функций ОТС.

**Анализ основных достижений и литературы.** Основная работа по управлению движением поездов осуществляется на отдельных участках железной дороги. Учитывая, что участков достаточно большое количество, и они расположены на значительном расстоянии друг от друга возникает необходимость эффективного управленческого аппарата и обеспечения связи между руководителями в центре управления железной дорогой и работниками на станциях и перегонах.

Для координации эксплуатационной работой железнодорожного транспорта, для организации движением поездов, управления энергосистемами, погрузкой, выгрузкой и другими технологическими операциями на отдельном участке железной дороги организовывается диспетчерский круг во главе с диспетчером.

Отделенческая оперативно–технологическая связь позволяет диспетчерам осуществлять установление соединения с абонентами соответствующих диспетчерских служб и с диспетчерами других отделений [1, 3].

Диспетчер также является абонентом диспетчерского круга, но при этом постоянно находится в режиме прослушивания группового канала и имеет приоритетное право индивидуального, группового или циркулярного вызова.

**Цель исследования.** Целью данной работы является исследование принципов построения цифровых систем коммутации без ответвления, с ответвлением, а также колец верхнего и нижнего уровня цифровых сетей оперативно–технологической связи железнодорожного транспорта Украины.

**Постановка задачи.** Разработать двухуровневую модель сети оперативно–технологической связи. Изучить коммутационные процессы, происходящие в сетях отделенческой оперативно–технологической связи.

**Основная часть исследований.** В процессе исследования определены основные элементы цифровых сетей оперативно–технологической связи – цифровые системы коммутации (ЦСК), пульта оперативно–технологической связи (ПОТС), телефонные аппараты различных абонентов и радиостанции поездной связи [6]. Различают распорядительные (ПОТС–Р) и исполнительные (ПОТС–И) пульта оперативно–технологической связи.

Цифровая система коммутации обеспечивает организацию избирательной связи, подключение индивидуального ПОТС, а также группового канала, позволяет избежать объединения различных видов связи [5].

Для обеспечения связи диспетчера с абонентами в режиме «один говорит – все слушают» используется комплект конференцсвязи (ККС). ККС включает в себя кольца первичного цифрового канала (ПЦК), объединенные в групповой канал либо соединяет разговорные тракты отдельных индивидуальных каналов.

Кольцо ПЦК также является одним из элементов цифровой сети ОТС и представляет собой структуру на базе ПЦК в форме замкнутой линии [3, 4].

В отличие от диспетчерского ПОТС–Р пульты исполнителей (дежурных по станции и других абонентов) ПОТС–И в начальном состоянии отключены от группового канала [6]. При вызове диспетчером абонента ПОТС–И подключается к групповому каналу. На рис. 1 и рис. 2 наглядно представлены соединения при индивидуальном и циркулярном вызовах соответственно. Соединения, указанные на рисунке непрерывной линией, производятся через коммутационное поле (КП). При вызове диспетчера абонентом диспетчерский пульт подключается к групповому каналу через КП, после чего абонент вызывает диспетчера «голосом». При этом вызов поступает на диспетчерский пульт, даже если он занят другим разговором.

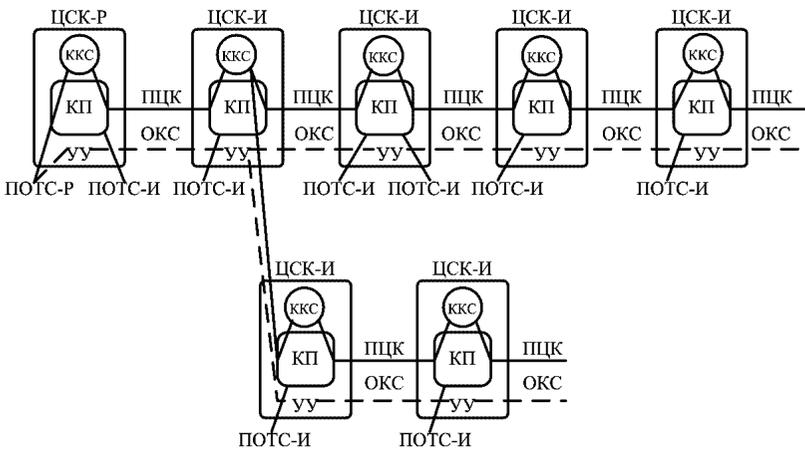


Рисунок 1 – Соединение при индивидуальном вызове в цифровых сетях ОТС

При циркулярном вызове к групповому каналу через КП возможно подключить несколько ПОТС–И, при этом штрихпунктирной линией на рис. 2 обозначены соединения, которые устанавливаются через КП при появлении вызова. Разговор в групповом канале производится по принципу «каждый с диспетчером» и «каждый с каждым».

Наглядно отобразить процедуру индивидуального вызова позволяет диаграмма, представленная на рис. 3. Диспетчер на цифровом пульте нажимает кнопку, соответствующую ПОТС конкретного абонента, после чего следует посылка вызывающей комбинации кода «2 из 7». Вызываемый абонент получает акустический сигнал и оптическую индикацию на ПОТС. Далее абонент нажимает кнопку прямой связи с диспетчером и «голосом» опрашивает вызов. Таким образом устанавливается соединение между абонентом и диспетчером при индивидуальном вызове. В случае нажатия отбоя с любой стороны канал автоматически освобождается.

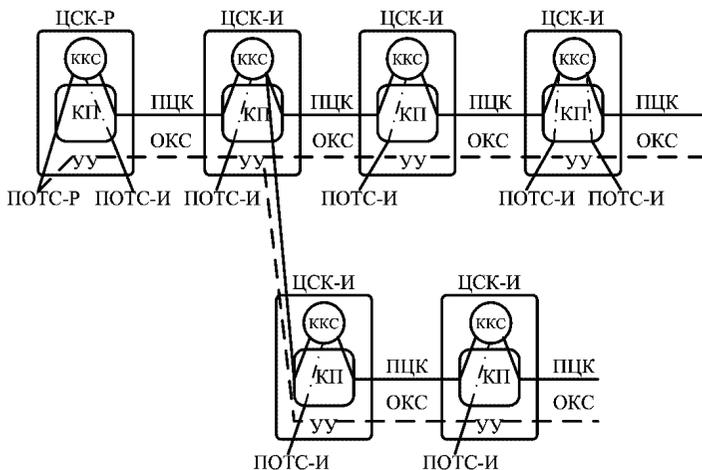


Рисунок 2 – Соединение при циркулярном вызове в цифровых сетях ОТС

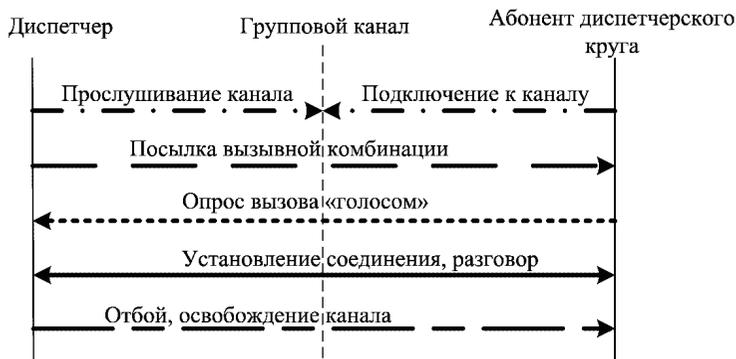


Рисунок 3 – Диаграмма вызова абонента диспетчерского круга диспетчером

При этом следует заметить, что при каждом вызове в цифровой сети ОТС передаются сигнальные сообщения, которые необходимы для обеспечения соединения по индивидуальным и групповым каналам. Для транспортировки сигнальных сообщений между управляющими устройствами (УУ) смежных ЦСК организуется общий канал сигнализации (ОКС). Данные, находящиеся в сигнальных сообщениях отображаются на дисплеях ПОТС–Р и ПОТС–И и содержат информацию об адресе вызываемого абонента (при индивидуальном вызове) или абонентах (при групповом или циркулярном вызовах), а также об адресе и должности вызывающего абонента.

При установлении соединения в групповом канале могут одновременно говорить несколько абонентов, для обеспечения такого режима работы предусмотрены цифровые сумматоры. Они входят в состав ККС в ЦСК. Цифро-

вые сумматоры позволяют объединить несколько разговорных трактов. Они имеют два входа (либо несколько входов) для трактов приема ПЦК и один выход для тракта передачи ПЦК.

На каждом из входов цифрового сумматора определяется наличие речевого сигнала. Если сумматор определяет наличие речевого сигнала только на одном из его входов, то такой сигнал передается на выход без изменений и преобразований. В случае, если речевые сигналы присутствуют на нескольких входах, то они суммируются и передаются на выход цифрового сумматора. Таким образом, сумматор определяет количество сигналов на входе, либо же их наличие или отсутствие и производит соответствующую операцию.

При организации разговорных трактов в диспетчерских кругах сети ОТС возникает проблема возможности возникновения местного эффекта [6]. Так как во время разговора диспетчера с абонентом круга другой абонент также может связаться с диспетчером, речь с пульта может попасть на громкоговоритель этого же пульта. Во избежание такого эффекта в ККС происходит разделение сумматоров, то есть некоторые из них подключаются к трактам передачи параллельно, другие последовательно. Следует заметить, что количество последовательно включенных сумматоров должно быть ограничено, так как каждый сумматор увеличивает шум, присущий каждому отдельно взятому речевому тракту, поступающему на вход.

Рассмотрим схему образования разговорных трактов в ЦСК с помощью цифрового сумматора, представленную на рис. 4.

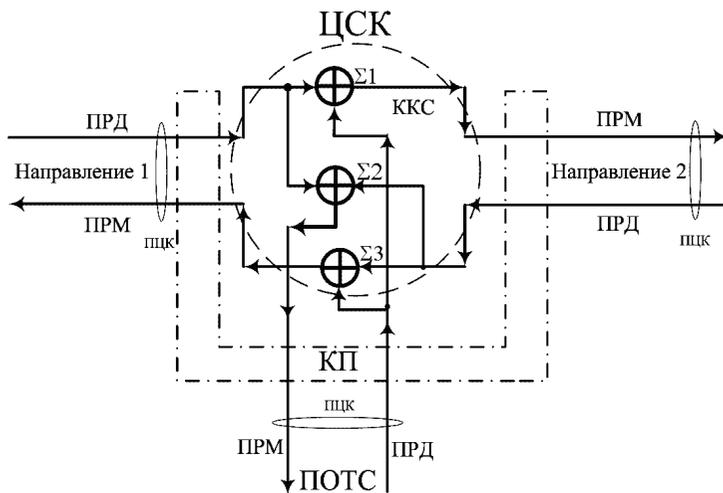


Рисунок 4 – Схема образования разговорных трактов в ЦСК

Как видно на рис. 4 сумматор 2 позволяет ПУТС принимать речевые сигналы из направления 1 и направления 2, так как он подключен параллельно

но. При этом сумматоры 1 и 3 разделяют передачу и подключены последовательно в каждый речевой тракт. Благодаря этому исключается описанный выше местный эффект.

Представленная на рис. 4 схема соответствует подключению пультов только в двух направлениях, без ответвлений. Также существует необходимость организации приема и передачи речевых трактов на участке цифровой сети ОТС с ответвлением. В таком случае количество сумматоров будет зависеть от количества ПОТС, которые подключаются в ЦСК через цифровые сумматоры. Например, если направлений три, то сумматоров потребуется пять.

На рис. 5 представлен фрагмент цифровой сети ОТС, состоящий из ЦСК с ответвлением (для распорядительных ЦСК) и без ответвления (для исполнительных ЦСК).

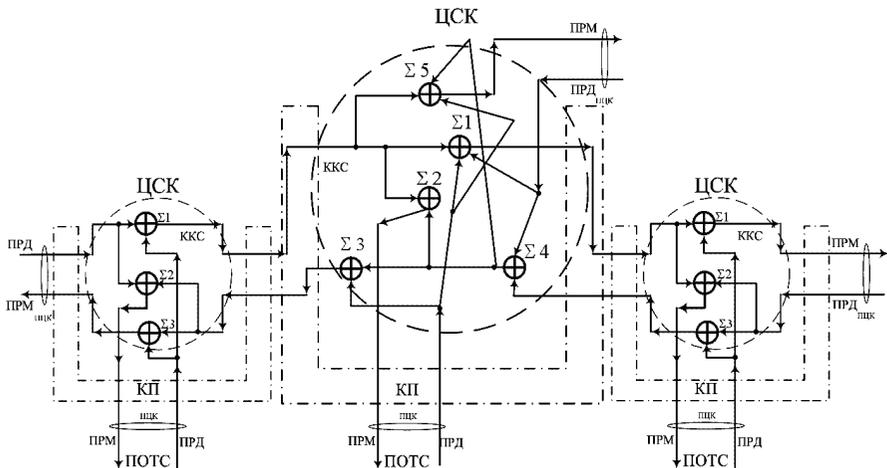


Рисунок 5 – Схема образования разговорных трактов на фрагменте цифровой сети ОТС

Как видно с рис. 5 процессы, происходящие при соединении в одном диспетчерском кругу достаточно сложные, а учитывая, что на участке железной дороге может находиться несколько диспетчерских кругов, возникает необходимость оптимизации процессов управления цифровой сетью ОТС. Для этого так называемые «пучки» ПЦК в пределах участка железной дороги объединяются в кольцо нижнего уровня (НУ). Таким образом, отделенческие ЦСК объединяются одним или несколькими 2 Мбит/с потоками [2, 7].

Кольца НУ могут не совпадать с диспетчерскими кругами. Групповой канал может организовываться как во всех ЦСК кольца, так и только на тех ЦСК, на которых это необходимо в зависимости от технологических потребностей диспетчерских кругов [3].

При этом следует уточнить, что соседние кольца НУ не должны пересе-

каться между собой, а ЦСК не могут входить одновременно в два или больше кольца НУ [4].

Кольцо верхнего уровня (ВУ) создается для передачи речевых сигналов между кольцами НУ в пределах отделения железной дороги. При этом ЦСК, входящая в кольцо НУ и кольцо ВУ одновременно и обеспечивающая интерфейс между данными кольцами является мостовой.

На мостовой станции осуществляется полупостоянное соединение канальных интервалов для разговорных трактов. Полупостоянным называется соединение в цифровой сети ОТС между объектами данной сети по выделенным каналам (групповой канал, каналы приема и передачи данных). Кроме того с помощью мостовых станций кольца НУ и ВУ объединяются в единый диспетчерский центр управления (ЕДЦУ), что позволяет обеспечить выполнение работ по эксплуатации железнодорожного транспорта в кратчайшие сроки.

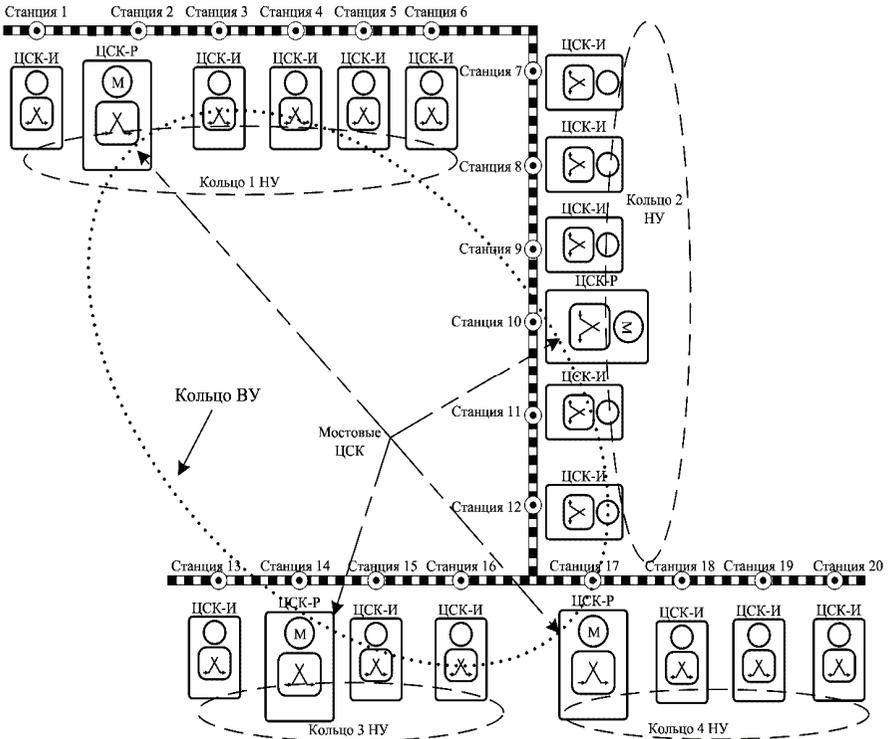


Рисунок 6 – Базовая модель сети ОТС

Базовая модель цифровой сети ОТС на основе колец НУ и ВУ представлена на рис. 6. Данная двухуровневая модель обеспечивает взаимодействие

диспетчерських кругів і установалення якісної відділенчеської опера- тивно–технологічеської зв'язі.

**Результати дослідів і висновки.** В результаті проведенного дослідів установалена необхідність організації відділенчеської опера- тивно–технологічеської зв'язі на залізнодорожньому транспорті України в соотвєтстві з вперше предложенної моделлю сєтї. Виведєні інформаці- онно–логічеські схєми і діаграмми установалення сєдїненїєв при рязліч- нїх вїдах зв'язєв в диспетчерському кругу.

Определєна необхідність построєня мостовїх цифровїх сїстєм коммутацієв, позволяючїх об'єдїнять 2 Мбіт/с потоки. Крімє того предло- жєна організації колєц нижнього і верхнього рєвнєй для передачї рязговор- нїх трактєв мєжду диспетчером і єго подчинєннїми в одном диспетчерському кругу, а тязжє мєжду диспетчерами рязлічнїх диспетчерських кругєв.

Разроботана інновационная двухурєвнєвая модель організації відді- ленчеської оперативно–технологічеської зв'язі на залізнодорожньому транс- портє України. Данная модель предствавлена в лабораторїях кафедри «Транспортная зв'язь» УкрГАЗТ, вїполнєнная на базє оборудованїя словєн- ської компанії IscraTel і харьковського научно–производственного предпрїя- тїя «Стальєнерго».

**Список літератури:** 1. Волков В. М. Технологічеська телефонна зв'язь на залізнодорожньому транспорті : учеб. для вузов ж.–д. транспорта / В. М. Волков, А. П. Зорько, В. А. Прокофьев; под ред. В. М. Волкова. – М.: Транспорт, 1990. – 294 с. 2. Дадов Г.И. Разроботка і соровождєніє сїстєм зв'язї і управлєнїя // Автоматика, зв'язь, інформатика. – 2006. – № 7. – С. 37–39. 3. ОСТ 32.145–2000. Сїстєма оперативно–технологічеської зв'язї залєзньох дорєг Россїи. Протоколы інформаціонно–логічєского взаїмодєєвїя об'єктєв цифровї сєтї. – М.: ВНИИАС МПС Россїи, 2000. – 39 с. 4. Писарєнко В.П., Шевцов А.Н. Сїстємы цифровї сєтї оперативно– технологічеської зв'язї. – Х.: Издательство ДВГУПС, 2007. 5. Хєїн Д. Ш.–М. Аппаратура опера- тивно–технологічеської проводной зв'язї : Справочник. – М.: Транспорт, 1992. – 271с. 6. Юркін Ю.В. Оперативно–технологічеська телефонна зв'язь на залізнодорожньому транспорті : Учебник для вузов залєзньох дорєг транспорта / Ю.В. Юркін, А.К. Лебєдїнский, В.А. Прокофьев, И.Д. Блїндєр. – М.: ГОУ «Учєбно–методічєский центр по образованїю на залєзньох дорєг транспорта», 2007. – 264 с. 7. Shiguo Lian, Madjid Merabt. Innovative multimedia communication and services. – Telecommunication Systems, Springer US, August 2013.

*Надїїшла до редколєгїї 20.09.2013*

УДК 621.391

**Исследованїє принципєв построєня цифровїх сєтєй оперативно–технологічеської зв'язї залєзньох дорєг транспорта України / С. И. Прїходько, А. С. Жучєнко, А. С. Во- лков, Н. В. Полянскова // Вісник НТУ «ХП». Сєрїя: Техніка та електрєфїзика вїсоких напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 60 (1033). – С. 100–108. – Бїбліогр.: 7 назв.**

Розглянуто принципї побудовї сїстєм комутацієв цифровїх мєрєж оперативно–технологічного зв'язку. Запропоновано організації мостовїх сїстєм комутацієв, яка об'єднєє 2 Мбіт/с потоки диспетчерських кїл в кїльця нижнього та верхнього рївнїв. Визначєно основнї функцієв цифровїх мостовїх сїстєм комутацієв. Розроблено дворївнєву модель цифровї мєрєжї оперативно– технологічного зв'язку.

**Ключєві слова:** сїстєми комутацієв, дворївнєвая модель, цифрова мєрєжа зв'язку.

The principles of creation switching digital systems of the departmental technological communications are considered. The organization of the bridge switching stations uniting 2 Mbps streams of dispatching circles in rings of the lower and upper levels is offered. The main functions of digital bridge switching systems are defined. The two-level model of a digital departmental technological communication networks is developed.

**Key words:** communications systems, two-level model, digital communication networks.

УДК 621.317.42

**М. М. РЕЗИНКИНА**, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., НТЦ МТО НАН Украины, Харьков;

**О. Л. РЕЗИНКИН**, д-р техн. наук, зав. каф., НТУ «ХПИ»;

**Е. Е. СВЕТЛИЧНАЯ**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛИННЫХ ПРОВОДЯЩИХ КАНАЛОВ

Приведены аналитические выражения для потенциалов и напряженностей электрического поля в окрестности тонких электропроводных стрежней, которые имитируют лидерный канал молнии. Рассмотрены случаи замены канала равномерно заряженной нитью, а также электропроводным эллипсоидом, на котором есть свободный заряд, и эллипсоидом, который находится в равномерном внешнем электрическом поле. Оценено влияние различных моделей лидерного канала молнии на величины таких параметров как емкость, заряд, распределение потенциалов и напряженностей электрического поля.

**Ключевые слова:** потенциалы и напряженности электрического поля, тонкие электропроводные стержни, электропроводный эллипсоид, емкость, заряд.

**Введение.** При нахождении распределения вероятности поражения молнией защищаемой территории и выборе средств молниезащиты требуется информация об уровнях напряженности электрического поля (ЭП) в рассматриваемых системах. Такие системы содержат тонкие вытянутые проводящие объекты, длина которых на несколько порядков превышает их диаметр. К таким объектам относятся как лидерный канал молнии, продвигающийся к земле в условиях грозовой обстановки, так и молниеотводы.

Значение емкости лидерного канала молнии  $C_L$  необходимо для определения связи между его зарядом  $Q_L$ , разрядным током возвратного удара главной стадии молнии  $I_L$  и ее потенциалом  $U_L$ . Величина тока возвратного удара главной стадии молнии может быть измерена. В настоящее время систематизированы экспериментальные данные о вероятности удара молнии с опреде-

© М. М. Резинкина, О. Л. Резинкин, Е. Е. Светличная, 2013

ленной величиной разрядного тока [1]. Из экспериментальных данных получены также зависимости, связывающие заряд, переносимый к земле лидерным каналом молнии, с током возвратного удара – см. рис. 1 [2 - 4].

**1 Аналитические представления ЭП и емкости лидерного канала молнии.** В инженерных расчетах для оценки параметров ЭП в окрестности тонкого проводящего канала, как правило, используется его замена нитью, вдоль которой равномерно распределен заряд (см. например [5, 6]). При этом выражение для потенциала тонкой заряженной нити длиной  $2 \cdot a$  записывается в виде [6, с. 96]:

$$\varphi(x, y, z) = \frac{Q}{8\pi\epsilon_0\epsilon a} \cdot \ln \frac{\sqrt{(y_1 + a)^2 + x_1^2 + z_1^2} + y_1 + a}{\sqrt{(y_1 - a)^2 + x_1^2 + z_1^2} + y_1 - a}, \quad (1)$$

где  $Q$  – заряд нити;  $x, y, z$  – координаты точки наблюдения;  $x_1, y_1, z_1$  – расстояния между центром нити и точкой наблюдения в направлениях  $X, Y, Z$  соответственно (нить расположена параллельно оси  $OY$ );  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится заряженная нить;  $\epsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11}$  Ф/м.

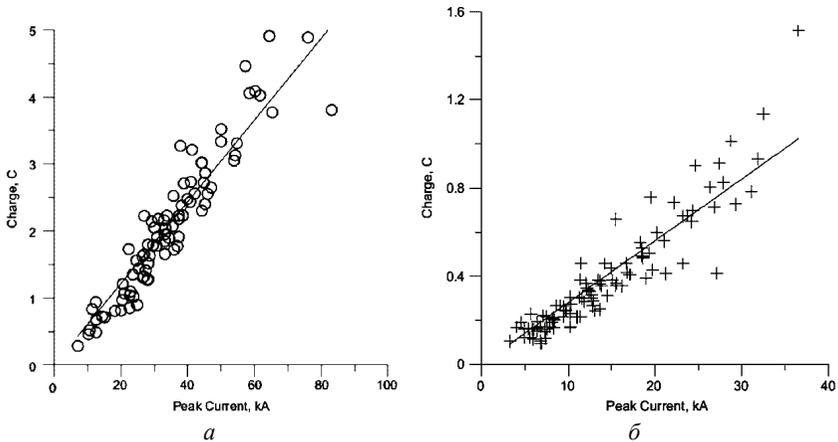


Рисунок 1 – Заряд лидерного канала молнии, нейтрализованный в первые 100 мкс (а) и 50 мкс (б) возвратного удара [2 - 4]

Этот подход используется для определения емкости провода, имеющего длину  $L$  и радиус  $r$ , причем его потенциал полагается равным потенциалу на поверхности провода в его середине [6, с. 99]):

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln(L/r)} \cdot L. \quad (2)$$

Данная формула используются также для нахождения параметров ли-

дерного канала молнии [7, 8].

При таком подходе не учитывается реальная ситуация, когда постоянным вдоль длины стержня остается потенциал, а не плотность заряда. Проводимость лидерного канала молнии достаточно велика. Так, в [7, с. 61] отмечается, что уровень напряженности ЭП в канале лидера для тока порядка 1 А не превышает  $10^4$  В/м, а значит величина его погонного сопротивления составляет порядка  $10^4$  Ом/м. Таким образом, падение напряжения на лидерном канале при его длине, например, в 1 км составляет до 10 МВ, в то время, как уровни потенциала молнии достигают 100 МВ. Это значит, что при оценке электрических параметров лидерного канала молнии в некотором приближении его допустимо полагать эквипотенциальным.

С учетом вышеизложенного, при определении электрических параметров лидерного канала молнии более корректным представляется использование аналитического решения для потенциала ЭП свободных зарядов на проводящем эллипсоиде [9, с. 189]:

$$\varphi = \frac{Q}{8\pi\epsilon_0\epsilon} \int_{\xi}^{\infty} \frac{d\xi}{R_{\xi}}, \quad (3)$$

где  $Q$  – полный заряд эллипсоида;  $R_{\xi} = \sqrt{(\xi + a^2)(\xi + b^2)(\xi + c^2)}$  (см. [9, с. 62]);  $a, b, c$  – полуоси эллипсоида.

После некоторых преобразований, выражения для потенциала и поверхностной плотности зарядов ( $\sigma$ ) на вытянутом эллипсоиде при  $a \gg b = c$  (большая полуось параллельна оси  $OY$ ), уравнение которого имеет вид (при  $\xi = 0$ ):

$$\frac{x^2}{b^2 + \xi} + \frac{y^2}{a^2 + \xi} + \frac{z^2}{b^2 + \xi} = 1, \quad (4)$$

записываются следующим образом [9, с. 190]:

$$\varphi = \frac{1}{8\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{Q}{\sqrt{a^2 - b^2}} \cdot \ln \frac{\sqrt{\xi + a^2} + \sqrt{a^2 - b^2}}{\sqrt{\xi + a^2} - \sqrt{a^2 - b^2}}; \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi ab^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{x^2}{b^4} + \frac{y^2}{a^4} + \frac{z^2}{b^4}}}. \quad (6)$$

При расчете емкости лидерного канала молнии следует учитывать, что реальному ЭП в условиях грозовой обстановки соответствует система, представляющая собой две бесконечные проводящие плоскости (земля с нулевым потенциалом и находящиеся над ней на высоте  $H_L$  имеющие потенциал  $U_L$  грозовые облака), в области между которыми средняя напряженность ЭП  $E_0 = U_L/H_L$ . Из верхней плоскости к нижней распространяется лидерный канал молнии, имеющий длину  $L_L$  и радиус поперечного сечения  $r_L$ , потенциал которого близок к  $U_L$ . При этом для достаточно больших расстояний между

вершиной лидерного канала и землей структура ЭП будет такой же, как при расположении в ЭП с напряженностью  $E_0$  проводящего канала длиной  $2 \cdot L_L$ , середина которого находится на высоте  $H_L$  над землей. Тогда, учитывая, что длина и заряд такого канала в 2 раза меньше, чем провода длиной  $2L_L$ , получим из (5) выражение для его заряда (при  $\xi = 0, a \gg b = c$ ):

$$Q = \varphi \cdot \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln(2 \cdot L_L / r_L)} \cdot L_L. \quad (7)$$

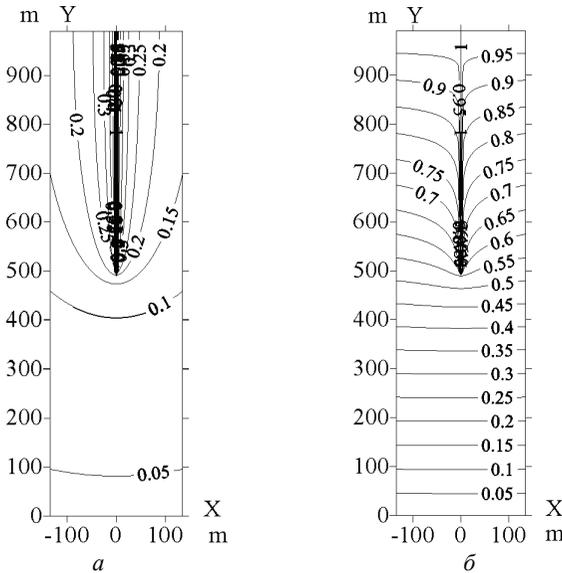


Рисунок 2 – Рассчитанные распределения линий равного потенциала  $\varphi^* = \varphi/U_L$ :  
 а - модель «заряженный эллипсоид»; б - модель «эллипсоид во внешнем однородном ЭП»

Распределение линий равного потенциала ЭП, рассчитанное в соответствии с (5) и совпадающее с распределением, рассчитанным с помощью (1), представлено на рис. 2, а. Расчет выполнен для системы, имитирующей приближающийся к земле в условиях грозовой обстановки лидерный канал молнии при следующих параметрах:  $L_L = a = 500$  м – длина лидера,  $r_L = b = c = 0,005$  м – эквивалентный радиус поперечного сечения лидерного канала,  $H = 500$  м – расстояние от края эллипсоида до нижней плоскости (земли),  $H_L = Y_{max} = a + H = 1000$  м - расстояние между находящимися под потенциалом плоскостями (землей и облаками),  $U_{ellips} = U_L$  - потенциал эллипсоида, полагаемый равным потенциалу грозовых облаков,  $\varphi^* = \varphi/U_L$  - потенциал в относительных единицах,  $E^* = E/E_{baz}$  - напряженность ЭП в относительных единицах,  $E_{baz} = 1$  В/ $H_L$ ,  $U_L = 10$  МВ. При этом полный заряд эллип-

соида рассчитывается в соответствии с (7) при  $\varphi = U_L$ .

На рис. 3, *a* и 3, *б* показаны распределения потенциала, рассчитанные по (1) и (5) соответственно. Из этих распределений видно, что для весьма длинных проводящих стержней распределения потенциалов для случаев равномерно заряженной нити (см. рис. 3, *a*) и проводящего эллипсоида (см. рис. 3, *б*) практически совпадают не только во внешней области (см. рис. 2, *a*), но и на самих стержнях за исключением зоны вблизи края стержня. Совпадают также значения емкости (2) и заряда (7).

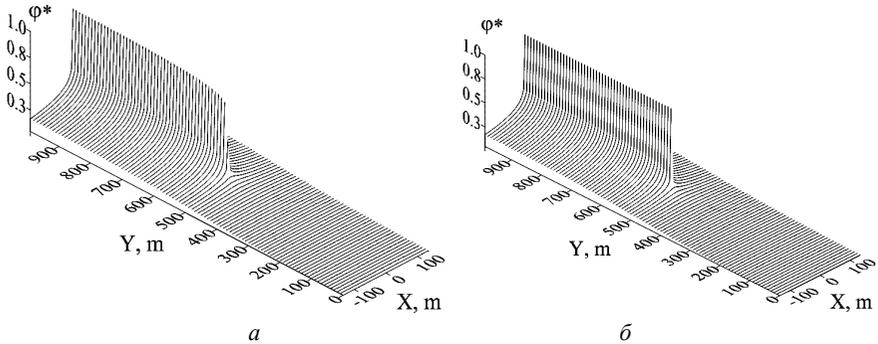


Рисунок 3 – Рассчитанные распределения потенциала. *a* - модель «заряд, равномерно распределенный по нити»; *б* - модель «заряженный эллипсоид»

**2 Представление лидерного канала молнии в виде электропроводного эллипсоида во внешнем ЭП.** Структура ЭП, когда его источником является заряд, распределенный по лидерному каналу молнии, не соответствует описанной выше модели, включающей две потенциальные плоскости. Для описания такого ЭП может быть использовано другое известное аналитическое решение для проводящего стержня, находящегося во внешнем электрическом поле (см. например [9, с. 190]). Если центр эллипсоида совпадает с началом координат, и он находится в однородном ЭП напряженностью  $E_0$ , выражение для потенциала вне эллипсоида имеет вид [9, с. 191]:

$$\varphi = E_0 \cdot y \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\int_0^\infty \frac{d\xi}{(\xi + a^2)R_\xi}} \int_\xi^\infty \frac{d\xi}{(\xi + a^2)R_\xi} \right]. \quad (8)$$

Распределение линий равного потенциала ЭП, рассчитанное в соответствии с (8) для ранее описанной системы, имитирующей приближающийся к земле в условиях грозовой обстановки лидерный канал молнии, представлено на рис. 2б. Как видно из сравнения рис. 2, *a* и 2, *б*, характерные особенности распределения ЭП для случая представления проводящего канала в виде заряженного эллипсоида, а также эллипсоида во внешнем ЭП существенно от-

личаются.

Проинтегрировав по  $x$  и  $y$  выражения для потенциала (5), получим компоненты напряженности ЭП в окрестности заряженного эллипсоида:

$$|E| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2},$$

где 
$$E_x = \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x}; \quad E_z = \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial z}; \quad E_y = \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial y};$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \xi} = \frac{Q}{8\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{1}{\sqrt{\xi + a^2} \cdot (\xi + b^2)}; \quad \frac{\partial \xi}{\partial x} = x \cdot \left[1 - \frac{f_1 - a^2}{\sqrt{f_1^2 - f_2}}\right]; \quad \frac{\partial \xi}{\partial z} = z \cdot \left[1 - \frac{f_1 - a^2}{\sqrt{f_1^2 - f_2}}\right];$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial y} = y \cdot \left[1 - \frac{f_1 - b^2}{\sqrt{f_1^2 - f_2}}\right]; \quad f_1 = -\frac{(a^2 + b^2) - [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]}{2};$$

$$f_2 = a^2 b^2 - b^2 \cdot [(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2] - a^2 \cdot (y - y_0)^2; \quad \xi = -f_1 \pm \sqrt{f_1^2 - f_2},$$

$\xi > -b^2$  [9, с. 61];  $x_0, y_0, z_0$  – координаты центра эллипсоида.

Проинтегрировав (8) по  $x$  и  $y$ , получим аналогичные выражения для проводящего эллипсоида в параллельном поле напряженностью  $E_0$ .

На рис. 4 представлены результаты расчета модуля напряженности ЭП для случаев использования формул, полученных в предположении, что источником ЭП является заряд на проводящем эллипсоиде (см. рис. 4, а), а также формул, полученных для случая, когда эллипсоид располагается во внешнем ЭП с напряженностью  $E_0$  (см. рис. 4, б). Как видно из сравнения рис. 4, а и 4, б, напряженности ЭП для данных представлений проводящего канала существенно отличаться. Можно показать, что суммарный заряд стержней, имеющих одинаковый потенциал, в  $0,5 \cdot H_L/L$  раз больше для моделей «равномерно распределенный по нити заряд» и «заряженный эллипсоид», чем для модели «эллипсоид во внешнем однородном ЭП».

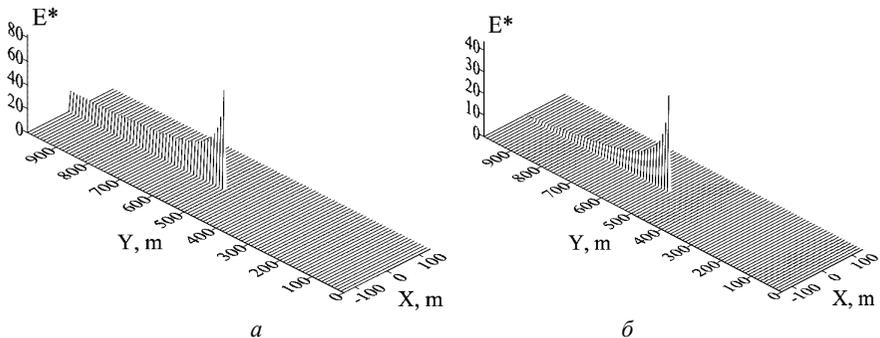


Рисунок 4 – Рассчитанные распределения напряженности ЭП  $E = |E|/E_{\text{вaz}}$ : а - модель «заряженный эллипсоид»; б - модель «эллипсоид во внешнем однородном ЭП»

**Заключение.** На основе анализа использования различных представлений лидерного канала молнии показано, что применение модели заряженного проводящего эллипсоида и модели равномерно распределенного по нити заряда дает практически одинаковые результаты электрических параметров длинных стержней. Данные результаты существенно отличаются от полученных при использовании модели «эллипсоид во внешнем однородном ЭП». Так, для рассмотренной системы, содержащей лидерный канал молнии в условиях грозовой обстановки, величина суммарного заряда при том же потенциале разрядного канала в первом случае в 4 раза больше, чем во втором.

**Список литературы:** 1. IEC 62305-1. International standard «Protection against lightning – Part 1: General principles». – Geneva: IEC, 2010. – 67 p. 2. *Cooray V., Rakov V., Theethayi N.* The lightning striking distance – Revisited // J. Electrostatics. – 2007. – № 65. – P. 296-306. 3. *Berger K.* Methods and results of lightning records at Monte San Salvatore from 1963–1971 // Bull. Schweiz. Elektrotech. – 1972. – Ver. 63. – P. 21403–21422. 4. *Berger K., Vogelsanger* Measurement and results of lightning records at Monte San Salvatore from 1955–1963 // Bull. Schweiz. Elektrotech. – 1965. – Ver. 56. – P. 2–22. 5. *Кучинский Г.С., Кизветтер В.Е., Пинталь Ю.С.* Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с. 6. *Круг К. А.* Физические основы электротехники. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1946. – 472 с. 7. *Базелян Э.М., Ражанский И.М.* Искровой разряд в воздухе. – Новосибирск: Наука, 1988. – 165 с. 8. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физматлит, 2001. – 319 с. 9. *Страттон Дж.А.* Теория электромагнетизма. – М.-Л.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1948. – 539 с.

*Поступила в редколлегию 28.10.2013*

УДК 621.317.42

**Электрические параметры длинных проводящих каналов / М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, Е.Е. Светличная // Вісник НТУ «ХП».** Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 60 (1033). – С. 108-114. – Бібліогр.: 9 назв.

Наведено аналітичні вирази для потенціалів і напруженостей електричного поля поблизу тонких електропровідних стрижнів, що імітують лідерний канал блискавки. Розглянуто випадки заміни каналу рівномірно зарядженою ниткою, а також електропровідним еліпсоїдом, на якому є вільний заряд, та еліпсоїдом, що знаходиться в рівномірному зовнішньому електричному полі. Оцінено вплив різних моделей лідерного каналу блискавки на значення таких параметрів як ємність, заряд, розподіл потенціалів та напруженостей електричного поля.

**Ключові слова:** потенціали та напруженості електричного поля, тонкі електропровідні стрижні, електропровідний еліпсоїд, ємність, заряд.

The analytical expressions for potentials and electric field intensity in the vicinity of thin conducting rods, simulating lightning leader channel have been presented. The cases of channel representation as a uniformly charged thread as well as a conducting ellipsoid with free charge and ellipsoid, located in uniform external electric field have been considered. Influence of the different representations of the lightning leader channel on the values of capacitance, charge, potentials' and electrical stress' distributions has been estimated.

**Key words:** potentials and electric field intensity, thin conducting rods, conducting ellipsoid, capacitance, charge.

**В. В. РУДАКОВ**, д-р техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»;

**В. Е. МАРЦЕНЮК**, ст. преп., НТУ «ХПИ»;

**С. В. РУДАКОВ**, канд. техн. наук, доцент, УНГЗУ

## ГРАДИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Приведены результаты расчета двухслойной изоляции коаксиальных цилиндрических электродов при постоянном радиусе внешнего электрода. Определена зависимость одинаковой максимальной напряженности поля в слоях от соотношения радиусов электродов. Рассчитаны значения максимальных напряженностей поля в бумажно-масляной изоляции разной плотности, соответствующие одинаковым ресурсам

**Ключевые слова:** градирование изоляции, высокое напряжение, ресурс.

**Введение.** Регулирование электрических полей путем градирования изоляции достаточно широко применяется в конструкциях различных высоковольтных устройств (высоковольтные вводы, коаксиальные системы обострения формы импульса напряжения, высоковольтные кабели, конденсаторы и др.) [1]. Суть эффекта градирования изоляции заключается в применении комбинации диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями, с размещением диэлектриков с повышенным значением диэлектрической проницаемости в зонах наибольшей неоднородности электрического поля. Для коаксиальных электродов с многослойным диэлектриком в работе [2] решена задача по определению размеров расположения многослойной изоляции при постоянном радиусе наружного электрода, по результатам которой приведены примеры выполнения градирования изоляции, улучшающие распределение электрического поля в промежутке. При анализе задачи в работе [2] допущена неточность, приведшая к неверному заключению о возможности выполнения двухслойной изоляции (рис. 1) с абсолютно оптимальными отношением радиусов и соответствующим отношением диэлектрических проницаемостей слоев:

$$\frac{r_3}{r_1} = 2,226; \quad \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = 1,557.$$

На рис. 1  $r_1, r_2, r_3$  – соответственно радиусы внутреннего электрода, границы раздела диэлектрических сред с диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , внешнего электрода.

Критерием оптимизации служило достижение одинаковых минимальных значений максимальных напряженностей электрического поля в слоях диэлектриков (на поверхности электрода и на границе раздела диэлектриков).

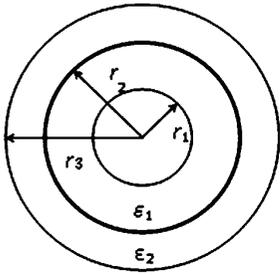


Рисунок 1 – Расчетная схема

**Целью настоящей статьи** является:

1. Уточнение решения задачи об оптимальном расположении слоев двухслойной изоляции при различных соотношениях диэлектрических проницаемостей слоев.
2. Определение оптимального расположения слоев, имеющих одинаковый ресурс, с учетом зависимости электрической прочности диэлектриков от соотношения диэлектрических проницаемостей слоев на примере бумажно-масляной изоляции.

**Постановка задачи 1.** Найти соотношение между диэлектрическими проницаемостями слоев  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , и радиусами  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$ , при которых максимальная напряженность поля на поверхности внутреннего электрода и на границе раздела сред одинакова и имеет минимальное значение (примем  $r_3 = \text{const.}$ ). Для этого случая должны выполняться условия [3]

$$\varepsilon_1 r_1 = \varepsilon_2 r_2, \quad (1)$$

$$E_{\max 1} = \frac{U_0}{\varepsilon_1 r_1 \left( \frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)}, \quad (2)$$

$$E_{\max 2} = \frac{U_0}{\varepsilon_2 r_2 \left( \frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)}, \quad (3)$$

где  $U_0$  – напряжение между электродами.

Введем обозначения  $\gamma = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} > 1$ ,  $m = \frac{r_3}{r_1} > 1$ .

Найдем экстремум  $E_{\max 1}$  полагая, что  $m \neq \text{const}$ ,  $r_3 = \text{const}$ , а  $\gamma$  – переменная величина, то есть для каждого конкретного отношения радиусов электродов  $m$  определим  $\gamma$ , при которой  $\gamma$  будет иметь минимальное значение. При этом радиус  $r_2$  границы раздела диэлектрических слоев, как и отношение,  $\gamma$  будут переменными величинами, причем  $\gamma r_1 = r_2$  [3]. Определяем первую производную по  $\gamma$  и приравняем нулю

$$\frac{\partial E_{\max 1}}{\partial \gamma} = \frac{\partial}{\partial \gamma} \left| \frac{U_0 m}{r_3 \left( \ln \gamma + \gamma \ln \frac{m}{\gamma} \right)} \right| = 0. \quad (4)$$

После вычисления производной и преобразований

$$\gamma \ln m = 1 - \frac{1}{\gamma} \quad (5)$$

или

$$m = \gamma e^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}. \quad (6)$$

Выражение (6) близко к линейной функции. Например, с точностью до 5 % выражение (6) можно представить в виде  $m = 2,531 \gamma - 1,633$ . Таким образом, для каждого значения  $m$  существует определенное значение  $\gamma$  соответствующее минимальным и одинаковым значениям  $E_{\max 1}$  и  $E_{\max 2}$ .

Введем  $E_{cp.0} = \frac{U_0}{r_3} = \text{const}$  – условное среднее значение напряженности

электрического поля при  $r_1 \rightarrow 0$ ,  $\left( E_{cp.0}(r_1) = \frac{U_0}{r_3 - r_1} \right)$ .

В случае однородного диэлектрика при  $\gamma = 1$  формула (5) неприменима, поскольку исходное выражение (2) не будет содержать  $\gamma$ . Известно [4], что при  $\gamma = 1$  и  $m = 2,72$  максимальная напряженность электрического поля имеет минимальное значение, равное  $2,72E_{cp.0}$ . Определим  $\eta$  – отношение максимальной напряженности электрического поля к  $E_{cp.0}$  для конкретных значений  $m$  и соответствующих значений  $\gamma$  ( $\gamma \neq 1$ ), для которых выполняется условие  $E_{\max 1} = E_{\max 2}$  с учетом (6)

$$\eta = \frac{E_{\max 1}}{E_{cp.0}} = \frac{m}{\ln \gamma + \gamma \ln \left( \frac{m}{\gamma} \right)} = \frac{\gamma e^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\ln \gamma + \gamma - 1}. \quad (7)$$

Зависимость (7) устанавливает соответствие (рис. 2) между минимальными значениями  $\eta$  для каждой пары значений  $m$  и  $\gamma$ , связанных условием (6).

Определим  $\gamma$ , для которого  $\eta$  принимает минимальные значения, взяв производную по  $\gamma$  и приравняв ее к нулю

$$\frac{\partial \eta}{\partial \gamma} = \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) (\ln \gamma - 1) = 0. \quad (8)$$

Откуда  $\gamma = e$ , что соответствует минимальному значению зависимости  $\eta$  от  $\gamma$ , приведенной на рис. 2. Таким образом, абсолютно оптимальными отношением радиусов и соответствующим отношением диэлектрических проницаемостей слоев при данной постановке задачи следует считать:

$$\frac{r_3}{r_1} = 5,11; \quad \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = e.$$

Анализ зависимости  $\eta = f(\gamma)$  показывает, что значения  $\gamma$ , при которых  $\eta$  превосходит минимальные значения не более чем на 10%, имеют широкий интервал изменения от  $\gamma \approx 1,5$  до  $\gamma \approx 5$ , а соответствующие им значения  $m$  согласно выражению (6) – от  $m = 2,16$  до  $m = 11$ .

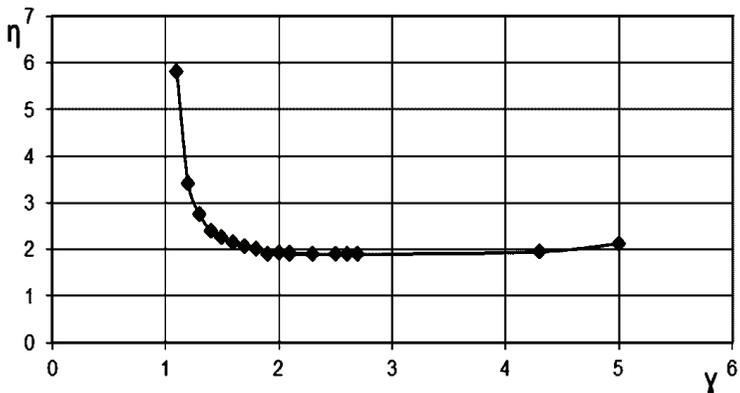


Рисунок 2 – Зависимость  $\eta$  от  $\gamma$

**Постановка задачи 2.** Найти соотношение между диэлектрическими проницаемостями слоев  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , и радиусами  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$ , при которых максимальная напряженность поля на поверхности внутреннего электрода и на границе раздела сред соответствует одинаковым ресурсам слоев. Как правило, с увеличением плотности одного и того же материала увеличивается его диэлектрическая проницаемость, а также электрическая прочность, например, для конденсаторной бумаги [5]. Поэтому условием равно прочности слоев в предположении отсутствия тепловых процессов будем считать равенство ресурсов каждого слоя. При этом максимальные напряженности в слоях будут отличаться. Введем обозначение

$$\beta = \frac{E_{\max 1}}{E_{\max 2}}, \quad (9)$$

полагая, что  $E_{\max 1} > E_{\max 2}$  а их значения соответствуют электрической прочности слоя 1 и слоя 2 соответственно.

В накопительных высоковольтных импульсных емкостных устройствах коаксиального типа с медленным зарядом, быстрым разрядом и небольшой частотой следования импульсов имеет смысл выполнять диэлектрик 1 из бумажной (кабельной) изоляции большой плотности, а диэлектрик 2 – меньшей. При этом должны быть подавлены эффекты теплового старения, что обеспечивается низкой частотой следования импульсов. В таблице приведены значения относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\text{ЭКВ}}$  широко применяемых бумажных диэлектриков различной плотности, пропитанных диэлектрическими жидкостями, рассчитанной по формуле [6]

$$\varepsilon_{\text{ЭКВ}} = \frac{\varepsilon_{\text{кл}} \varepsilon_{\text{д}}}{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{кл}}}\right) \varepsilon_{\text{кл}} + \frac{\rho}{\rho_{\text{кл}}} \varepsilon_{\text{д}}}, \quad (10)$$

где  $\rho_{\text{кл.}}$  – плотность клетчатки, ( $1,55 \text{ г/см}^3$ );  $\rho$  – плотность бумаги;  $\epsilon_{\text{кл.}}$  – относительная диэлектрическая проницаемость клетчатки, ( $\epsilon_{\text{кл.}} = 6,6$ );  $\epsilon_{\text{д}}$  – относительная диэлектрическая проницаемость жидкого диэлектрика ( $\epsilon_{\text{д}} = 2,2$  для трансформаторного масла,  $\epsilon_{\text{д}} = 4,6$  – для касторового масла).

Таблица – Значения  $\epsilon_{\text{эжв}}$  пропитанной маслами конденсаторной бумаги

Плотность бумаги г/см <sup>3</sup>	0,8	1	1,2	1,35
Жидкий диэлектрик				
Трансформаторное масло	3,353	3,859	4,546	5,246
Касторовое масло	5,451	5,718	6,010	6,249

По результатам таблицы определены отношения диэлектрической проницаемости бумаги с большей плотностью к меньшей. Например, если в составе слоя 1 использовать бумагу плотностью  $1,2 \text{ г/см}^3$ , а в качестве слоя 2 –  $0,8 \text{ г/см}^3$ , пропитанные трансформаторным маслом, то  $\gamma_1 = 1,35$ . При пропитке бумаге плотностью  $1,35 \text{ г/см}^3$  и  $1 \text{ г/см}^3$  касторовым маслом  $\gamma$  соответственно составит  $\gamma_2 = 1,09$ .

Для определения длительной электрической прочности в зависимости от плотности бумаги проведены испытания в импульсном режиме бумажно-касторовой изоляции пластинчатых секций при напряженности электрического поля  $135 \text{ кВ/мм}$ , частоте разрядного тока  $100 \text{ кГц}$ , декременте колебаний  $1,38$  и частоте следования импульсов  $2,7 \text{ Гц}$ . Испытания показали, что с увеличением плотности бумаги от  $1 \text{ г/см}^3$  до  $1,35 \text{ г/см}^3$  ресурс увеличивается в  $\sim 6$  раз (рис. 3). Учитывая, что напряженность электрического поля обратно пропорционально ресурсу в степени  $\sim 0,167$  [6], принимаем, что при одном и том же ресурсе электрическая прочность бумаги плотностью  $1 \text{ г/см}^3$  меньше электрической прочности бумаги плотностью  $1,35 \text{ г/см}^3$  в  $\beta \approx 1,3$  раза. Согласно формулам (2) и (3) и рис. 3 наименьшее значение максимальной напряженности и одинаковое в 2-х слоях будет достигнуто при  $\gamma = 1,09$ .

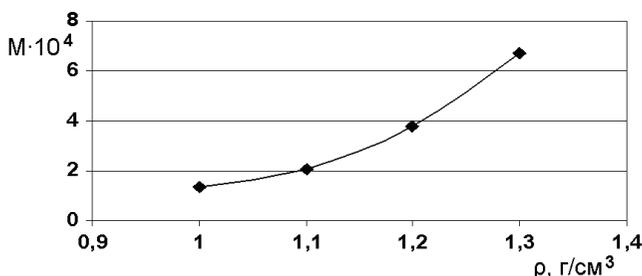


Рисунок 3 – Зависимость среднего срока службы секций импульсных конденсаторов с пропиткой касторовым маслом от плотности конденсаторной бумаги

Однако максимальная напряженность поля в слое 2 должна превысить

ожидаемое для заданного ресурса значение напряженности поля  $\beta \approx 1,3$  раза. Чтобы добиться одинаковых условий по ресурсу в обоих слоях необходимо, чтобы выполнялось равенство  $E_{\max 1} = 1,3 E_{\max 2}$ . Это возможно, если  $r_2/r_1 = \beta\gamma = 1,42$  без изменения отношения радиуса наружного электрода к радиусу внутреннего ( $m$ ) в отличие от первой задачи. Т.е. если для задачи 1  $r_1, r_2$  являются переменными величинами, то в данной задаче переменной является только  $r_2$ . При этом должно выполняться условие  $\beta\gamma < m$ . Если  $\beta\gamma > m$ , то  $r_2$  станет больше  $r_3$ , что лишено физического смысла. Преобразуем

(2) с учетом того, что  $\frac{E_{\max 1}}{E_{\max 2}} > 1$ , а

$$\frac{r_2}{r_1} = \beta\gamma; \quad \frac{r_2}{r_3} = \frac{\beta\gamma}{m}, \quad (11)$$

$$\eta = \frac{E_{\max 1}}{E_{cp.0}} = \frac{m}{\ln m - (\gamma - 1) \ln \frac{\beta\gamma}{m}} \quad (12)$$

и найдем  $\eta$ , полагая, что  $\beta$  – постоянная, а  $\gamma$  – переменная величины.

Определим минимальное значение  $\eta$  в зависимости от  $m$ , приравняв нулю производную от  $\eta$  по  $\gamma$  из (12)

$$\gamma \ln m - (\gamma - 1) \ln \beta\gamma - \gamma = 0, \quad (13)$$

откуда

$$m = e(\beta\gamma)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}, \quad (14)$$

где  $e$  – основание натурального логарифма.

Тогда для варианта с бумагой, пропитанной трансформаторным маслом  $\gamma_1 = 1,35$ , а для пропитанной касторовым маслом –  $\gamma_2 = 1,09$ , и с учетом для обоих вариантов  $\beta \approx 1,3$ , соответствующие значения  $m$  составят  $m_1 = 3,14$  и  $m_2 = 2,8$ . Эти значения  $m$  близки к варианту заполнения зазора между электродами одним диэлектриком, когда  $m_0 = e = 2,72$ . Если применить двухслойную бумажную изоляцию, пропитанную трансформаторным маслом, то коэффициент  $\eta_1$ , вычисленный по формуле (12) составит 2,33. В случае пропитки касторовым маслом –  $\eta_2 = 2,57$ . Таким образом, выигрыш по максимальной напряженности электрического поля в случае применения двухслойного диэлектрика по сравнению с однослойным будет небольшим. В приведенных задачах 1 и 2 будет достигнуто уменьшение напряженности поля соответственно в 1,17 раза и в 1,06 раза по сравнению с однослойным вариантом, для которого  $\eta_0 = e$ . Это приведет к увеличению ресурса соответственно в 2,56 раза и в 1,4 при больших напряженностях поля, характерных, например, для высоковольтных импульсных конденсаторов [6]. Для длительно работающих систем (малых напряженностей поля в случае кабельных конструкций) это увеличение составит 5,6 и 1,9, поскольку в этом случае,

напряженность электрического поля обратно пропорционально ресурсу в степени  $\sim 0,09$  [7].

Для двухслойных систем с другими значениями  $m$  при тех же  $\gamma$  изменится  $\beta$ , что приведет к неодинаковым ресурсам по слоям и уменьшению ресурса системы в целом.

### **Выводы.**

1. Определена зависимость относительной максимальной напряженности электрического поля  $\eta$  в коаксиальной конструкции электродов с двухслойным диэлектриком от соотношения диэлектрических проницаемостей  $\gamma$ , радиусов электродов  $m$  при постоянном значении радиуса внешнего электрода. Минимальное  $\eta$  соответствует  $\gamma = 2,72$  и  $m = 5,1$  при одинаковых значениях максимальных напряженностей электрического поля в слоях.

2. Приведена экспериментальная зависимость ресурса от плотности бумажно-масляной изоляции в импульсном режиме работы. Показано, что для бумажно-масляной изоляции в диапазоне плотностей бумаги от 1,0 до 1,35 (для трансформаторного масла) ресурс может увеличиваться до 6 раз.

3. Для двухслойной бумажно-масляной изоляции с равным расчетным ресурсом слоев, но с разными значениями максимальной напряженности электрического поля в слоях ожидается увеличение ресурса до 2,56 по отношению к ресурсу однослойной изоляции. При этом отношение радиусов электродов составляет  $m_1 = 3,14$  (для трансформаторного масла) и  $m_2 = 2,8$  (для касторового масла).

**Список литературы:** 1. Бейер М., Бек В., Меллер К., Цаенгль В. Техника высоких напряжений: Теоретические и практические основы применения : Пер. с нем. / Под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с. 2. Рудаков В.В., Рудаков С.В. Оптимизация конструкции коаксиального кабеля с многослойным диэлектриком // Электротехника и электромеханика. – 2004. – № 4. – С. 70-73. 3. Основы кабельной техники : Учебн. пособие для вузов / Под ред. В.А. Приведенцева. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 472 с. 4. Рудаков В.В. Срок службы кабельной изоляции как функция «напряженного объема» // Техническая электродинамика. – 1998. – № 5. – С. 8-10. 5. Карабанов В.И., Сочнев Г.К. Бумаги повышенной плотности для производства конденсаторов с высокой удельной энергией // Электронная промышленность. – 1976. – Вып. 2. – С. 32-35. 6. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. – Л.: Энергия, 1973. – 176 с. 7. Багелис Д.С., Белегуссов Н.И., Саакян А.Е. Справочник по кабелям. – М.: Энергия, 1971. – 704 с.

УДК 621.315.2

**Градуирование изоляции высоковольтных импульсных коаксиальных конструкций / В. В. Рудаков, В. Е. Марценюк, С. В. Рудаков** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 60 (1033). – С. 115-122. – Бібліогр.: 7 назв.

Приведені результати розрахунку двохшарової ізоляції коаксіальних циліндричних електродів постійного радіусу зовнішнього електроду. Визначена залежність однакової максимальної напруженості поля у шарах ізоляції від співвідношення радіусів електродів. Обчислені значення максимальної напруженості у паперово-масляної ізоляції різної щільності, що відповідають однаковим ресурсам.

**Ключові слова:** градування ізоляції, висока напруга, ресурс.

The results of the calculation of a two-layer insulation of coaxial cylindrical electrodes with a constant radius of the outer electrode were given. The same maximum field strength in the layers dependence on the ratio of the electrodes radii was determined. The values of the maximum field strength in paper-oil insulation of different densities, which are corresponding to the same service lives were calculated.

**Keywords:** insulation calibration, high voltage, service life.

УДК 621.317.3

**А. Ю. ЧЕРНУХИН**, мл. науч. сотр., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;  
**В. В. КНЯЗЕВ**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НИПКИ «Молния»  
НТУ «ХПИ»;  
**П. Н. МЕЛЬНИКОВ**, науч. сотр. НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

## **КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА С МОЛНИЕПРИЕМНИКОВ**

Проведены измерения параметров силы тока коронного разряда со стержня при различных скоростях изменения напряженности электрического поля. Доказано идентичность процессов при спадании и нарастании напряженности электрического поля для скорости изменения не более  $10^5 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}\text{с}^{-1}$ . Результаты могут быть использованы при оценке эффективности молниеприемников.

**Ключевые слова:** молниеприемник, ток короны, электрическое поле, стример.

### **Введение**

Известно [1, 2], что процесс ориентировки нисходящей молнии, имеющей отрицательный потенциал, связан с условиями формирования встречного лидера с заземленных объектов. Это обстоятельство обусловлено тем, что отрицательные молнии фактически перехватываются встречными лидерами, восходящими от заземленных объектов. Для экспериментального исследования этого процесса требуется высоковольтный стенд, способный осуществлять пробой воздушного промежутка длиной более 10 м. Разрядное напряжение генератора импульсных напряжений (ГИН) для этого должно быть не менее 3,5 МВ. Эксплуатация таких стендов связана со значительными финансовыми затратами. Поэтому, целесообразно, основные подходы и идеи отрабатывать на стендах с разрядным напряжением до 1,2 МВ, которые способны сформировать начальную стадию процесса пробоя длинного воздушного промежутка – стримеры. В работах [3, 4] представлены результаты экспериментальных исследований токов короны со стержневых молниеприемников различных геометрических форм и размеров. Обосновано использование в качестве эталонного стального стержня квадратного сечения размером

© А. Ю. Чернухин, В. В. Князев, П. Н. Мельников, 2013

12x12 мм. В работе [5] предложен метод исследования параметров силы тока коронного разряда с молниеприемников в условиях электрического поля, изменяющегося (уменьшающегося) во времени по экспоненциальному закону. Авторы выдвинули гипотезу об обратимости процесса, что процесс протекания коронного разряда в случае повышения напряжения по аналогичному закону (если рассматривать осциллограмму справа -налево), будет идентичным. В процессе обсуждения результатов этих работ на Всеукраинской конференции ПАСЕБ-2012 и международной научно-практической конференции MicroCAD-2013 была сформулирована указанная далее задача.

### **Цель исследований**

Определить зависимость параметров силы тока коронного разряда от знака производной функции изменения во времени уровня напряженности электрического поля.

### **Метод и результаты исследования**

Исследования проведены на стержневом эталоне молниеприемнике, размещавшихся между двумя параллельными металлическими плоскостями. Размеры плоскостей: нижняя – 4,02 x 6,56 м, верхняя – 3,63 x 5,22 м. Схема испытательной установки для исследования характеристик тока короны при постоянном и изменяющемся напряжении приведена в работе [5]. В этом варианте нижняя плоскость заземлена. Верхняя плоскость потенциальная – на нее подавалось высокое напряжение (ВН) от повысительно-выпрямительного устройства ПВУ-200. Расстояние (Н) между плоскостями варьировалось в диапазоне от 1,4 до 3,5 м, что позволяло изменять значение напряженности электрического поля. Соответственно, менялось расстояние (S) между вершиной молниеприемника и верхней плоскостью. Стержень устанавливался на нижней заземленной плоскости на изоляционной подставке и был присоединен к плоскости через сопротивление шунта ( $R_{ш} = 50 \text{ Ом}$ ), как показано на рис. 1.

Временная зависимость формировалась следующим образом: на верхнюю плоскость подавался постепенно повышающийся потенциал отрицательной полярности до значения 180 кВ, выдерживался некоторое время (около минуты), достаточное для регистрации силы тока установившейся короны, после чего, производилось отключение ПВУ-200. Далее, происходил разряд в RC цепи по классическому закону спада напряжения на конденсаторе, а, следовательно, и на исследуемом промежутке. На рисунке 2 представлены осциллограммы этого процесса для расстояния S равного 0,4 м. На осциллограмме кривая 1 описывает силу тока короны, а кривая 2 – значение напряжения на формирующей емкости. Скорость самостоятельного разряда емкостей ПВУ является индивидуальной особенностью данной установки. Важным является то, что этот процесс высокостабильный при проводимых экспериментах. Коэффициент деления примененного делителя равен  $10^4$ . Соответственно, чувствительность схемы измерения напряжения 50 кВ/дел. Чувствительность схемы измерения силы тока короны 80 мА/дел.

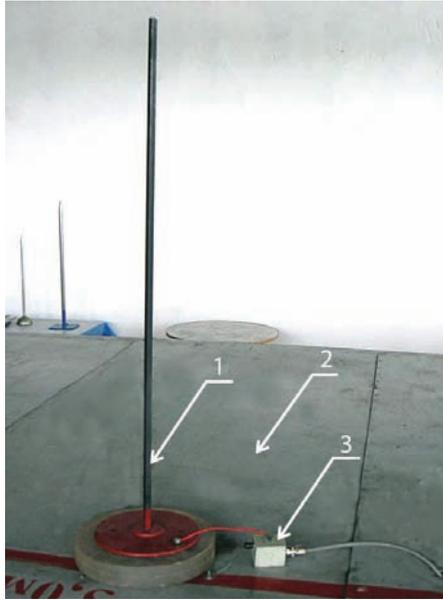


Рисунок 1 – Молниеприемник с подключенным шунтом:  
 1 – молниеприемник; 2 – нижняя плоскость; 3 – шунт 50 Ом

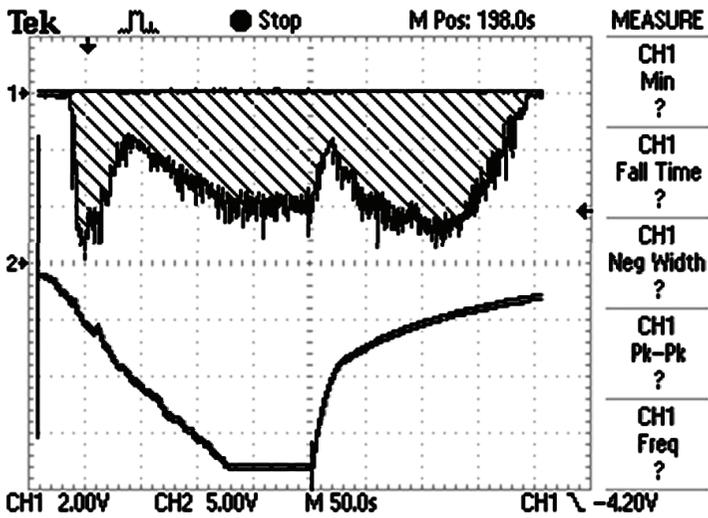


Рисунок 2 – Осциллограммы процесса для  $S$  равного 0,4 м  
 (CH1 – 40 мА/дел; CH2 – 50 кВ/дел)

Доказательство независимости параметров процесса образования коронного разряда от знака производной кривой временной зависимости напряженности электрического поля, т.е. нарастания и спадания, строится на сравнении значений силы тока коронного разряда на левой и правой ветвях рис. 2 при одинаковых значениях напряженности электрического поля.

Результаты обработки осциллограмм представлены на рис.3, отображающем зависимость усредненного значения силы тока коронного разряда от напряженности электрического поля при росте с постоянной скоростью (кривая 1) и спадании по экспоненте (кривая 2).

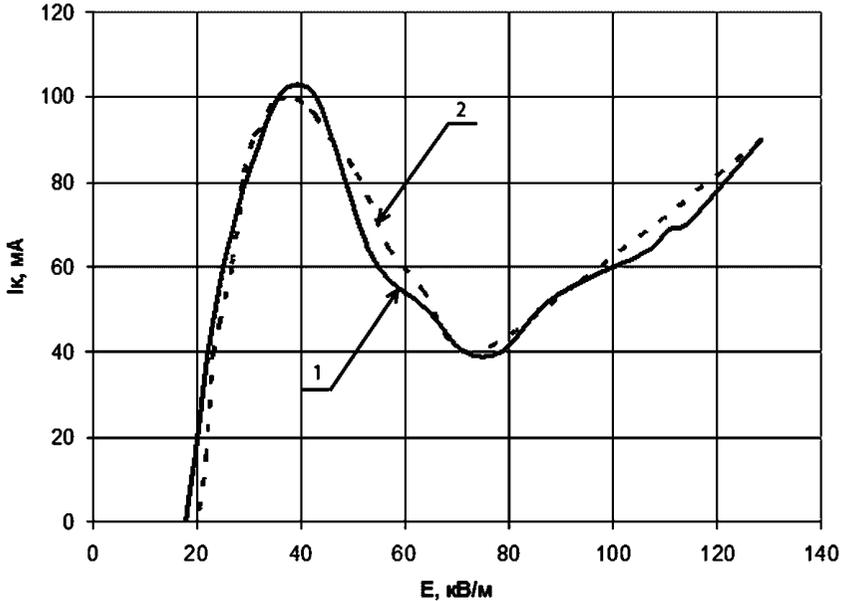


Рисунок 3 – Зависимость усредненного значения силы тока коронного разряда от напряженности электрического поля: кривая 1 – сплошная линия – для нарастающей напряженности  $E$ -поля; кривая 2 – пунктирная линия – для спадающей напряженности  $E$ -поля)

Кривые 1 и 2 зависимости силы тока коронного разряда от напряженности электрического поля совпадают в пределах погрешности проведенных измерений (7 %). В представленных результатах значение напряженности электрического поля рассчитано как частное от деления потенциала верхней пластины на расстояние  $H = 1,4$  м между пластинами. Сравнение кривых на рис. 3 показывает, что значение силы тока коронного разряда определяется значением напряженности электрического поля, и не зависит от предыдущей истории процесса. Сохраняется наличие «провала» в интервале между

60 кВ/м и 80 кВ/м. Следовательно, процесс образования тока короны в данном временном диапазоне (скорость изменения не более  $10^5 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}\text{с}^{-1}$ ) можно считать квазистатическим.

Результаты получены в рамках выполнения научно-исследовательской работы (ГР №0212U005986), которая выполняется по заказу Министерства образования и науки Украины в 2013-2014 годах.

### **Выводы**

Экспериментально доказано, что значение силы тока коронного разряда определяется значением напряженности электрического поля, и не зависит от предыдущей истории процесса при условии, что скорость изменения напряженности электрического поля не более  $10^5 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}\text{с}^{-1}$ .

Подтверждена гипотеза, высказанная в работе [5].

Предполагается, что диапазон квазистатического развития процесса справедлив для более широкого диапазона скорости изменения напряженности электрического поля. Например, для длительностей фронта превышающих 200 мкс, что при подаче импульсной волны соответствует предельной скорости нарастания напряженности электрического поля  $2 \cdot 10^8 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}\text{с}^{-1}$ . Указанные предельные значения согласуются с аналогичными параметрами, регламентируемыми в стандарте NF C 17-102 [6].

**Список литературы:** 1. *Cooray V. Lightning Protection / Edited by V. Cooray // The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom. – 2010. – 1070 p.* 2. *Базелян Э.М. Физика молнии и молниезащиты. / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 320с.* 3. Розробка методу оцінки захисних властивостей новітніх видів пристроїв блискавкозахисту – активних блискавкоприймачів та розсіювачів / Звіт про НДР Інв.0212U008336. – ХПІ, Харків, 2012. – 234 с. 4. *Князев В.В. Характеристики стримерной короны при постоянном напряжении на молниеприемниках с различными формами вершин и поперечных сечений / В.В. Князев, П.Н. Мельников, А.Ю. Чернухин // Вестник НТУ «ХПИ». Серия «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2012. – Вып. 21. – С. 111-117.* 5. *Чернухин А.Ю. Корреляция силы тока коронного разряда стержневого молниеприемника и напряженности изменяющегося электрического поля / А.Ю. Чернухин, В.В. Князев, П.Н. Мельников // Вестник НТУ «ХПИ». Серия «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2013. – Вып. 27. – С.155-162.* 6. NF C 17-102: 2011. Lightning protection. Protection of structures and open areas against lightning using early streamer emission air terminals.

*Поступила в редколлегию 20.09.2013*

УДК 621.317.3

**Квазистатическое развитие коронного разряда с молниеприемников / А. Ю. Чернухин, В. В. Князев, П. Н. Мельников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 122-127. – Бібліогр.: 6 назв.**

Здійснено вимірювання параметрів сили струму коронного розряду зі стрижня за різноманітних швидкостях зміни напруженості електричного поля. Доведено ідентичність процесів за спадання та зростання напруженості електричного поля за умов що швидкість зміни не перевищує  $10^5 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}\text{с}^{-1}$ . Результати можуть бути використано при оцінці ефективності блискавкоприймачів.

**Ключові слова:** блискавкоприймач, струм корони, електричне поле, стример.

Measuring of the corona current parameters is carried out from a terminal after different rate-of-change of tension of electric-field. The identity of processes is well-proven for a slump and increase of tension of electric-field at terms that speed of change of not more than  $10^5 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Results can be used for the estimation of efficiency of terminals.

**Keywords:** terminal, current of crown, electric field, streamer.

УДК 621.391

**М. В. ШИМКІВ**, студентка, УкрДАЗТ, Харків;

**В. П. ЛИСЕЧКО**, канд. техн. наук, доцент, УкрДАЗТ, Харків;

**О. М. ПРОГОННИЙ**, канд. техн. наук, доцент, УкрДАЗТ, Харків;

**А. В. ГУМЕНЮК**, студентка, УкрДАЗТ, Харків

## **МЕТОД МОНИТОРИНГУ СПЕКТРУ НА ОСНОВІ ЦИФРОВОЇ УЗГОДЖЕНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ**

В статье исследуется метод мониторинга спектра на основе цифровой согласованной фильтрации. Метод основан на использовании характеристик согласованного фильтра для оценки занятости радиочастотного спектра. Приведены результаты моделирования, соответствующие теоретическим положениям.

**Ключевые слова:** мониторинг спектра, согласованная фильтрация, радиочастотный спектр.

**Постановка проблеми.** Розвиток телекомунікаційних систем безпроводового доступу до мережі Інтернет став причиною різкого збільшення навантаження на обмежені ресурси радіочастотного спектру, що ділиться на діапазони, які виділяються різним системам. У наш час практично весь діапазон розподілений та ліцензований, що призвело до очевидного дефіциту спектру, тобто перевантаженні в певних смугах частот. Однак багато смуг частот виділені системам, які використовують їх неефективно, або системам, ступінь використання якими виділених діапазонів частот різко змінюється час від часу [2, 6]. Отже, існує багато смуг доступного спектру, які через політику виділення фіксованої частоти не можуть бути використані. Тому, існує гостра потреба в більш динамічному використанні спектру радіочастот, який забезпечував би гнучкий і рівномірний спосіб використання доступних ресурсів.

Когнітивне радіо є вирішенням проблеми спектрального перевантаження, представляючи собою механізм інтелектуального управління, який забезпечує більш ефективне використання діапазонів частот, що не використовуються ліцензованими користувачами [3].

© М. В. Шимків, В. П. Лисечко, О. М. Прогонний, А. В. Гуменюк, 2013

Задачею статті є дослідження методу моніторингу спектру на основі цифрової узгодженої фільтрації, метою якого є боротьба з неефективним використанням радіочастотного спектру в когнітивних радіомережах.

**Аналіз літератури.** У сучасній літературі описуються методи моніторингу спектру: виявлення сигналів на основі узгодженої фільтрації, детектування енергії, виявлення на основі ознак циклостационарності, детектування на основі форми сигналу і виявлення сигналів на основі радіо-ідентифікації та інші. Зокрема, метод моніторингу спектру на основі цифрової узгодженої фільтрації розглянуто і проаналізовано недостатньо.

Цифрова узгоджена фільтрація в часовій області є швидшою і точнішою, однак методи вибору параметрів сигналу фільтра для досягнення максимального співвідношення сигнал/шум, зокрема, на сьогоднішній день розроблені ще неповно [5].

**Мета статті.** Дослідження методу моніторингу для виявлення сигналів в когнітивних радіомережах, на основі узгодженої фільтрації, що дозволить отримати результати, які в подальшому допоможуть створити оптимальний підхід для розв'язання поставленої задачі.

### **Основний матеріал.**

#### **1. Моніторинг спектру на основі цифрової узгодженої фільтрації.**

Моніторинг спектру – це прийняття рішення щодо виду та класу сигналу, моніторинг включає стадію оцінки та стадію прийняття рішення [1]. Вторинна когнітивна мережа в процесі моніторингу повинна прийняти рішення згідно двох можливих гіпотез: або частотний діапазон зайнятий, або вільний. Чим більше даних про природу сигналу первинного користувача має система, тим більш надійним буде процес прийняття рішення. У випадку, коли немає ніяких даних про ліцензовані термінали, датчик енергії базується на підході, що являється найбільш загальним шляхом моніторингу спектру, і який не вимагає високої обчислювальної складності. Якщо система має деякі попередні знання про первинний сигнал, можуть бути використані складніші методи. Узгоджений фільтр для такої системи оптимальний в тому сенсі, що він максимізує відношення сигнал/шум, тому такий метод доцільно застосовувати для запобігання виникнення спектральних колізій, тобто зайняття різними вторинними терміналами однієї смуги частот. Це вимагає того, щоб первинний сигнал був апіорі відомий [4]. Основна перевага узгодженої фільтрації – це короткий час, необхідний для досягнення певної ймовірності помилкового виявлення або ймовірності пропуску сигналу у порівнянні з іншими методами. У реальних системах первинною мережею може використовуватися пілот-сигнал. Наприклад, в стандарті цифрового телебачення (DTV) використовується безліч синусоїдних пілот-сигналів, розташованих в різних частотних точках [3].

Як показано на рис. 1 узгоджений фільтр детектує отриманий сигнал через пілот-сигнал з допомогою рівняння [3]:

$$V(m) = \sum_N x(m) \cdot x_p(m)^* , \quad (1)$$

де  $x(m)$  – отриманий сигнал в адитивному білому Гаусівському шумі;  $x_p(m)^*$  – спряжений з пілот-сигналом.

Зазвичай, пілот-сигнал вибирається як ортогональний до даного і може розглядатися незалежно. Значення порівнюється з фіксованим порогом  $\lambda$ , знайденим за допомогою критерію Неймана-Пірсона, і, таким чином здійснюється прийняття рішення щодо наявності сигналу первинного користувача [3].

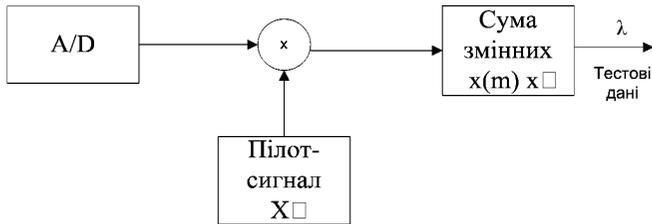


Рисунок 1 – Визначення пілот-сигналу з допомогою узгодженої фільтрації

**2. Цифрова узгоджена фільтрація.** Узгоджена фільтрація (УФ) є ефективним засобом для виявлення різноманітних сигналів, зокрема шумоподібних, на фоні завад. Цифрова узгоджена фільтрація (ЦУФ) вимагає великого числа математичних операцій для обчислення згортки сигналу і імпульсної характеристики фільтра. Цифрову фільтрацію можна здійснювати, як в часовій, так і в частотній областях.

Оптимальний пристрій, який приймає і виявляє вузькосмугові сигнали на фоні білого Гаусівського шуму повинен виробляти значення кореляційного інтеграла виду, який служить мірою подібності двох сигналів [5]:

$$R_{US} = \int_0^{T_c} U(t) \cdot S(t) dt , \quad (2)$$

де  $T_c$  – тривалість сигналу;  $S(t)$  – відомий сигнал, який ми підводимо на аналітичний вхід фільтра (тобто пілот - сигнал), вигляд якого наведено на рис. 2.

При розповсюдженні на радіостанції до вихідного сигналу домішується шум, і в результаті отримуємо:

$$U(t) = S(t) + n(t) , \quad (3)$$

На рис. 3 приведено зображення імпульсного вхідного сигналу  $U(t)$ .

Імпульсна характеристика узгодженого фільтра є дзеркальним відображенням відомого сигналу  $S(t)$ , в нашому випадку цей сигнал і є пілот-сигналом [5]:

$$h_0(t_0 - x) = S(x) , \quad (4)$$

де  $x$  – це затримка, з якою слідує дзеркально відображений сигнал.

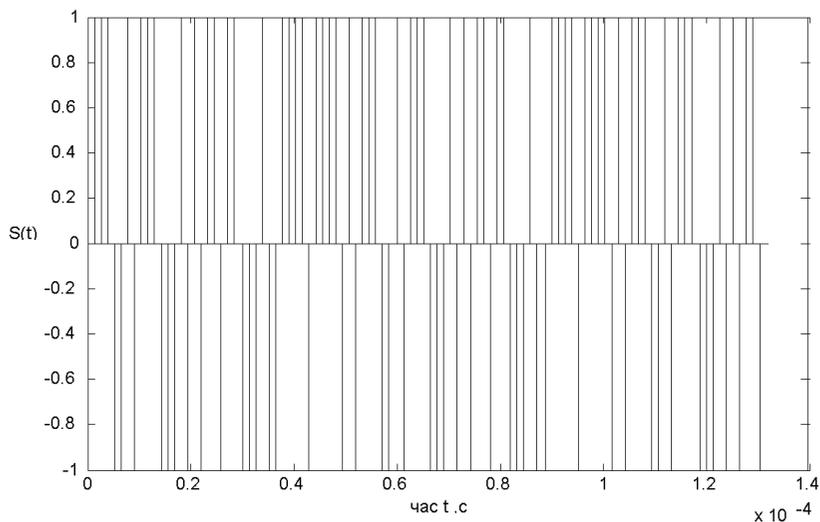


Рисунок 2 – Графік пілот - сигналу

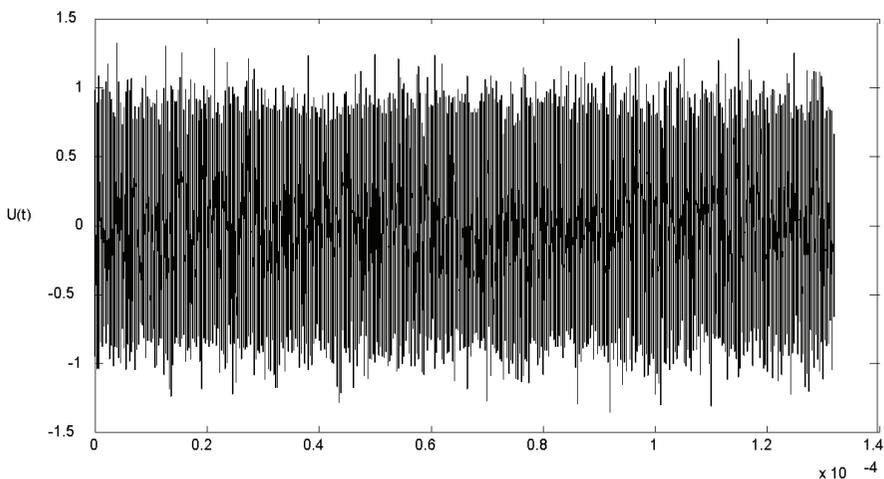


Рисунок 3 – Графік імпульсного вхідного сигналу

А так як у нас фільтрація відбувається в цифровому узгодженому фільтрі, то [5]:

$$h(mT) = S[(Nc - m)T], \quad (5)$$

де  $T$  – період дискретизації;  $Nc = \tau_c/T$  – число відліків сигналу, що очікується;  $\tau_c$  – тривалість сигналу;  $M$  – число відомих відліків.

На першому етапі здійснюється порівняння ширини смуги вхідних сигналів та імпульсної характеристики.

Потім фільтрований сигнал зводиться в квадрат і інтегрується по інтервалу спостереження  $t$ . Вихідний ефект після кореляції порівнюється із вже відомим порогом  $\lambda$ , і якщо цей ефект не перевищує цього значення, то на вході оптимального приймача є сигнал.

Блок-схема детектора на основі ЦУФ представлена на рис. 4.

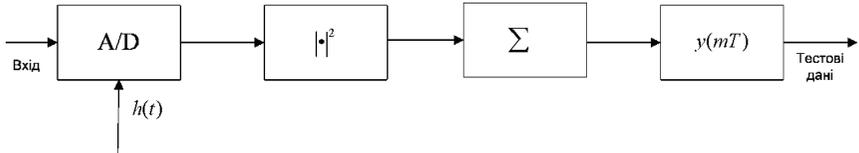


Рисунок 4 – Детектор на основі ЦУФ

Вихідний ефект цифрового узгодженого фільтра – це добуток імпульсної характеристики на  $U(t)$ , який виражається виразом лінійної згортки [5]:

$$y(mT) = \sum_{m=0}^{n_c} S[(Nc - m)T] \cdot u[(n_c - m)T]. \quad (6)$$

При виконанні дослідження вихідного ефекту використовуємо вираз (6). В результаті отримуємо вираз який наведено нижче:

Якщо  $(n_c - i_c) = z$  і припустити що  $U(t) = S(t)$ , то отримаємо функцію автокореляції, яка проводить порівняння імпульсної характеристики і сигналу:

$$R(mT) = \sum_{z=0}^{i_c-1} S(zT) \cdot S[m - (i_c - z)T], \quad (7)$$

де  $i_c$  – число символів імпульсної характеристики;  $z$  – число відліків сигналу.

**3. Цифрова узгоджена фільтрація в часовій області.** Цифрова узгоджена фільтрація в часовій області є швидшою і точнішою. Вона проводиться в квадратурних каналах.

Комплексна, що охоплює вхідний сигнал на виході квадратурного змішувача [5]:

$$U(m) = uc(m) - jus(m), \quad (8)$$

де  $uc(m)$  та  $jus(m)$  – дійсна та уявна складові вхідного сигналу відповідно.

Комплексна, що охоплює пілот-сигнал на виході квадратурного змішувача:

$$H^*(m) = hc(m) + jhs(m), \quad (9)$$

де  $hc(m)$  та  $jhs(m)$  – дійсна та уявна складові вхідного сигналу відповідно.

Тоді сигнал на виході ЦУФ визнач відношенням для дискретної згортки:

$$v(m) = vc(m) + jvs(m) = \sum_{z=0}^{i_c-1} [uc(m-z) - jus(m-z)] \cdot [hc(ic-z) + jhs(ic-z)], \quad (10)$$

де  $m$  – число відліків, що очікується;

$$vc(m) = uc(m) + hc(m);$$

$$jvs(m) = jus(m) + jhs(m).$$

Якщо  $(i_c - z) = l$  і виразити  $z = i_c - l$ , то отримаємо вихідний ефект цифрового узгодженого фільтра у часовій області:

$$v(m) = \sum_{l=1}^{ic} [uc(m - (ic - l) \cdot T) - jus(m - (ic - l) \cdot T)] \cdot [(hc(l) + jhs(l)) \cdot T]. \quad (11)$$

На рис. 5 наведено графік функції кореляції пілотного сигналу із імпульсною характеристикою цифрового узгодженого фільтра на виході системи.

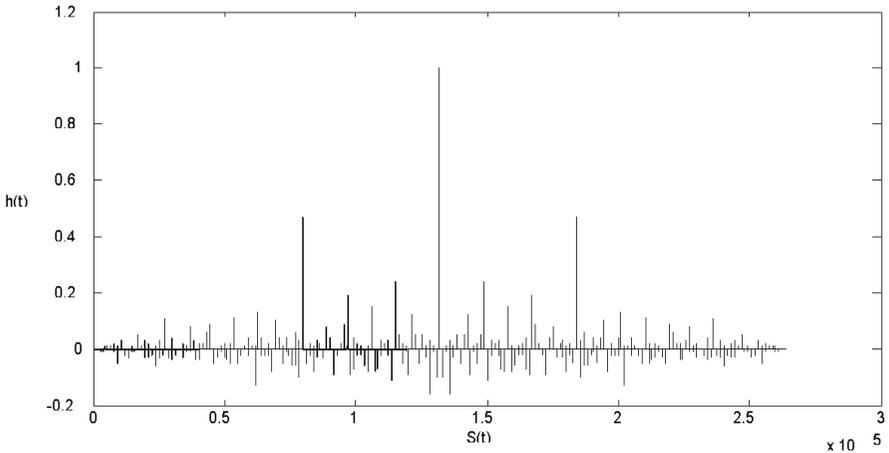


Рисунок 5 – Графік вихідного ефекту ЦУФ

При виконанні дослідження вихідного ефекту ЦУФ в часовій області використовуємо вираз (12). В результаті отримуємо вираз наведено нижче:

$$Rus(mT) = \int_0^T \sum_{l=1}^{ic} [uc(m - (ic - l)) - jus(m - (ic - l))] \cdot [hc(l) + jhs(l)] \cdot \lambda. \quad (12)$$

Вираз (12) дозволяє провести тестування отриманого на виході сигналу із пороговим значенням  $\lambda$ , тобто залежність взаємкореляційної функції вхідного сигналу (див. рис. 3) та пілотного сигналу (див. рис. 2), результат якого наведено на рис. 6.

З рисунку видно, що залежність має подобу із функцією автокореляції, однак, внаслідок наявності завад, максимальні викиди бічних пелюсток мають значно менші значення, ніж у АКФ сигналів без шуму, проте вони є достатніми для прийняття однозначного рішення про наявність очікуваного сигналу.

На рис. 7 наведено вигляд функції взаємної кореляції різних вхідного та пілотного сигналів, які належать до одного ансамблю.

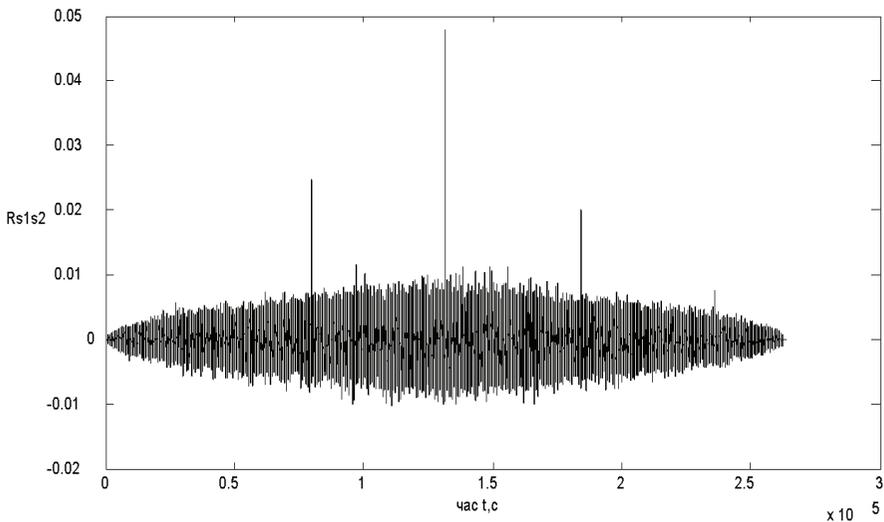


Рисунок 6 – Графік функції взаємної кореляції двох різних сумішей сигналів

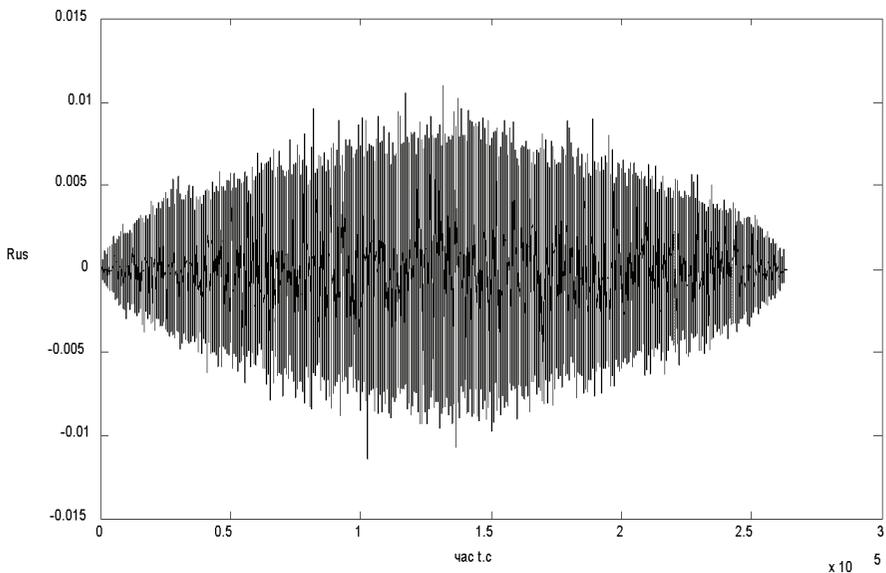


Рисунок 7 – Графік взаємкореляційної функції

З рис. 7 видно, що рівень максимальних викидів бічних пелюстків функції взаємної кореляції відповідає теоретичним положенням та набагато менший за рівень максимальних викидів АКФ очікуваного вхідного та пілотного сигналів.

Процес тестування вихідного ефекту із пороговим значенням було змодельовано в середовищі математичного програмування Matlab. Результати оцінки тестування наведено на рис. 8.

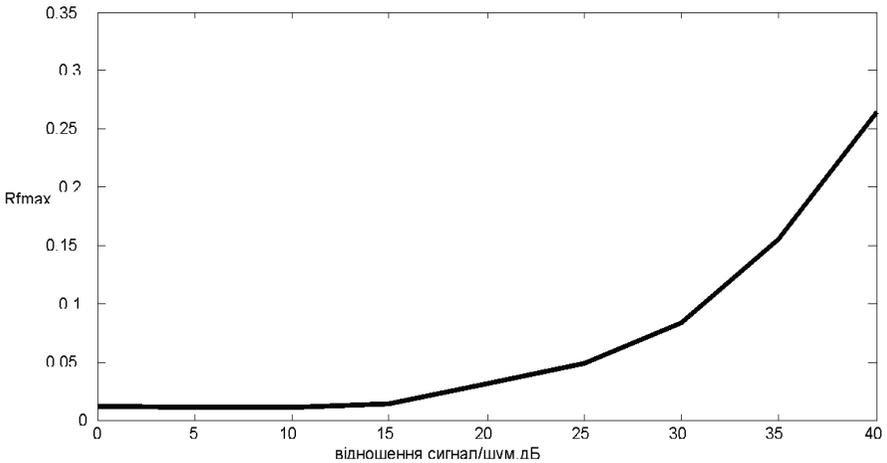


Рисунок 8 – Результати тестування

З рис. 8 видно, що завдяки розробленому методу моніторингу на основі цифрової узгодженої фільтрації, можливе забезпечення такого відношення сигнал/шум, щоб значення максимальних викидів бокових пелюстків функції взаємної кореляції очікуваного вхідного та пілотного сигналів було максимальним. В результаті було отримано залежність максимальних викидів функції взаємної кореляції очікуваного вхідного сигналу із пілотним сигналом від відношення сигнал/шум. Очевидно, що чим краще завадостійкість, тим більшим буде значення функції взаємної кореляції, і, відповідно, тим легша процедура прийняття рішення про наявність очікуваного сигналу. Таким чином, результати моделювання відповідають теоретичним положенням.

### Висновки

У статті було розроблено метод моніторингу спектру для когнітивної радіомережі на основі цифрової узгодженої фільтрації, який відрізняється від відомих тим, що завдяки максимізації відношення сигнал/шум, тобто модифікації часової структури шляхом збору енергії, яка узгоджується із пороговим значенням і в завершенні кожного інтервалу передачі символу, являє собою результат фільтрації у вигляді максимальних значень амплітуди, дозволяє запобігти виникненню спектральних колізій за рахунок зменшення часу необхідного для досягнення певної ймовірності помилкового виявлення або ймовірності пропуску сигналу. Метод засновано на використанні характеристик узгодженого фільтра для оцінки зайнятості радіочастотного спек-

ру. Наведено результати моделювання, що відповідають теоретичним положенням. Однак в подальшому необхідно провести більш детальне статистичне дослідження розробленого методу.

**Список літератури.** 1. *B. Fette* Cognitive radio technology // Newnes. – 2006. 2. *E. Sousa* Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design tradeoffs // IEEE Communications Magazine. – 2008. – P. 33. 3. Моніторинг спектру у каналах із завмираннями та частотними спотвореннями. Системи обробки інформації // *В.П. Лисечко, І.І. Сопронюк, О.В. Сєверінов* // ХУПС ім. І. Кожедуба. – Х.: 2010. – Вип. 9 (90). – С. 94-98. 4. Метод моніторингу спектра в когнитивних радіосетях на основі БПФ. Вестник Национального технического университета // *І. І. Сопронюк, В. П. Лисечко* // Вісник НТУ «ХПИ». – 2011. – Вип. 16. – С. 173-180. 5. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : Пер. с англ. / *Б. Скляр.* – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с. 6. *J. Mitola III, G. Q. Maguire Jr.* Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal // IEEE Pers. Commun. – Aug. 1999. – Vol. 6, № 4. – PP. 13-185 : *B.A. Fette, Ed.,* Cognitive Radio Technology, Elsevier, 2006.

*Надійшла до редколегії 28.10.2013*

УДК 621.391

**Метод моніторингу спектру на основі цифрової узгодженої фільтрації / М. В. Шимків, В. П. Лисечко, О. М. Прогонний, А. В. Гуменюк** // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПИ», 2013. – № 60 (1033). – С. 127-135. – Бібліогр.: 6 назв.

У статті досліджується метод моніторингу спектру на основі цифрової узгодженої фільтрації. Метод засновано на використанні характеристик узгодженого фільтра для оцінки зайнятості радіочастотного спектру. Наведено результати моделювання, що відповідають теоретичним положенням.

**Ключові слова:** моніторинг спектру, узгоджена фільтрація, радіочастотний спектр.

The method of monitoring the spectrum was researched in the article on the basis of a digital matched filter. The method is based on the characteristics of the matched filter to estimate the spectrum of employment. Simulation results are corresponding to the theoretical propositions.

**Key words:** monitoring the spectrum, matched filter, radio frequency spectrum.

**О. В. ШУТЕНКО**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»;  
**Д. Н. БАКЛАЙ**, ассистент, НТУ «ХПИ»

## **ОСОБЕННОСТИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ В МАСЛЕ ГАЗОВ**

В статье предложен трехэтапный алгоритм статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний, который позволяет выполнить оценку законов распределения диагностических критериев для интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов. Дано описание статистических критериев, используемых для формирования однородных массивов данных. Приведены примеры исследований законов распределения трех диагностических критериев, используемых для интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов.

Ключевые слова: хроматографический анализ, отношения пар газов, частичные разряды, развивающийся дефект.

**Введение.** Для постановки диагноза по результатам измерения концентраций газов, растворенных в масле высоковольтного маслонаполненного оборудования, используются несколько диагностических критериев [1, 2]. К ним относятся собственно значения концентраций газов, значения скоростей нарастания газов и отношения пар газов. Следует отметить, что как сами критерии, так и их значения в разных методиках по интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ) существенно различаются. Оценка законов распределения этих критериев, для оборудования с разным состоянием, представляет практический интерес как минимум с двух позиций:

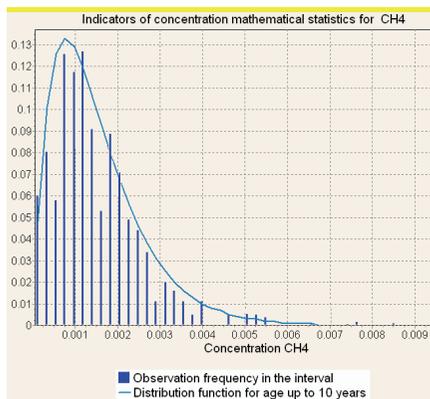
1. Не зная законов распределения диагностических критериев невозможно оценить вероятности ошибок I и II-го рода (ложная тревога и пропуск цели) а, следовательно, и выполнить оценку достоверности принятия решений, при использовании различных критериев;
2. Не обладая информацией о распределениях диагностических критериев, для оборудования с различным диагнозом невозможно определить их граничные значения, которые бы обеспечивали минимальное число ошибочных решений, или минимальное значение экономического ущерба при принятии ошибочного решения, или минимальное значение вероятности одной из ошибок при заданном значении вероятности другой ошибки.

Таким образом, исследование и анализ законов распределения диагно-

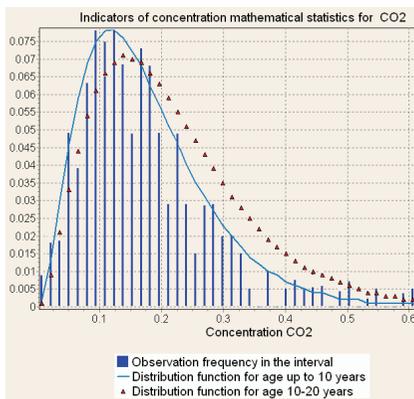
стических критериев, используемых для интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов, является актуальной и практически значимой задачей.

**Анализ публикаций.** Большинство публикаций в открытых литературных источниках в основном посвящены, исследованиям распределений концентраций растворенных в масле газов. При этом результаты, приведенные разными исследователями, отличаются. Так в работах [3, 4] было предложено разделить газы, по виду распределения, на две группы: первая –  $H_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ; вторая –  $CO$ ,  $CO_2$ . Огибающая гистограммы распределения первой группы (см. рис. 1, а) описывается выражением:

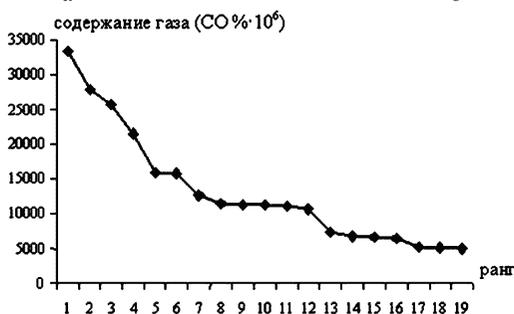
$$F = \frac{A^2 \cdot x \cdot e^{-Ax}}{Q}$$



а



б



в

Рисунок 1 – Функции распределения концентраций растворенных в масле газов, полученные разными исследователями: а, б – огибающие гистограммы распределения концентраций газов первой и второй группы; в – концентрация оксида углерода

Функция распределения оксида и диоксида углерода (см. рис. 1, б) описывается выражением:

$$F = \frac{A^4 \cdot x^2 \cdot e^{-Ax}}{Q},$$

где  $A$  – коэффициент, задающий форму;  $Q$  – коэффициент масштабирования;  $x$  – значение анализируемого газа.

В тоже время в работе [5], указывается, что концентрации газов (в частности оксида углерода) для трансформаторов напряжением 110-220 кВ, имеют ранговое распределение (см. рис. 1, в).

В работе [6] для аппроксимации концентраций газов использовано распределение экспоненциального типа:

$$p(x) = \frac{\alpha}{2\sigma\lambda \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)} \cdot e^{-\left(\frac{|x_i - m|}{\sigma\lambda}\right)^\alpha},$$

где  $x_i$  – текущее значение переменной;  $m$  – оценка математического ожидания;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение;  $\alpha$  – параметр распределения;

$\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)$  – гамма-функция от аргумента  $\frac{1}{\alpha}$ ;  $\lambda = \sqrt{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) / \Gamma\left(\frac{3}{\alpha}\right)}$ .

Выполненный анализ, позволил предположить, что полученные различия между законами распределения, предложенными разными исследователями могут быть объяснены различными методами статистической обработки. Исходя из данных приведенных в [5], предварительная обработка результатов ХАРГ не выполнялась. В работе [6] для формирования массивов с однородными концентрациями использовался факторный анализ. При формировании массивов с однородными концентрациями в [3, 4], однородные массивы формировались с учетом анализа факторов, влияющих на изменения концентраций газов, после чего был использован статистический критерий на равенство математических ожиданий и процедура ленивого сглаживания. Учитывая влияние процедуры статистической обработки, на результат оценки законов распределения диагностических критериев, формирование алгоритма статистической обработки результатов ХАРГ является актуальной и практически значимой задачей.

**Цель статьи.** В статье предложен алгоритм статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний для исследования законов распределения критериев, используемых для интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов.

**Метод решения.** Для определения закона распределения случайной величины, эмпирические данные должны принадлежать к одной генеральной

совокупности. То есть данные должны быть однородными. Очевидно, что в условиях реальных и длительных эксплуатационных воздействий, учитывая сложность процессов газовыделения и многообразия внешних факторов, результаты эксплуатационных испытаний априори являются неоднородными. Причины неоднородности обусловлены, прежде всего, различными условиями эксплуатации трансформаторов, особенностями конструктивного исполнения, разными сортами залитого масла и т.д. Если при формировании однородных массивов данных, учет особенностей конструктивного исполнения (наличие, либо отсутствие устройства РПН, тип защиты и т. д.) и сорта масел, не представляет особенных сложностей, то учет эксплуатационных воздействий возможен далеко не всегда.

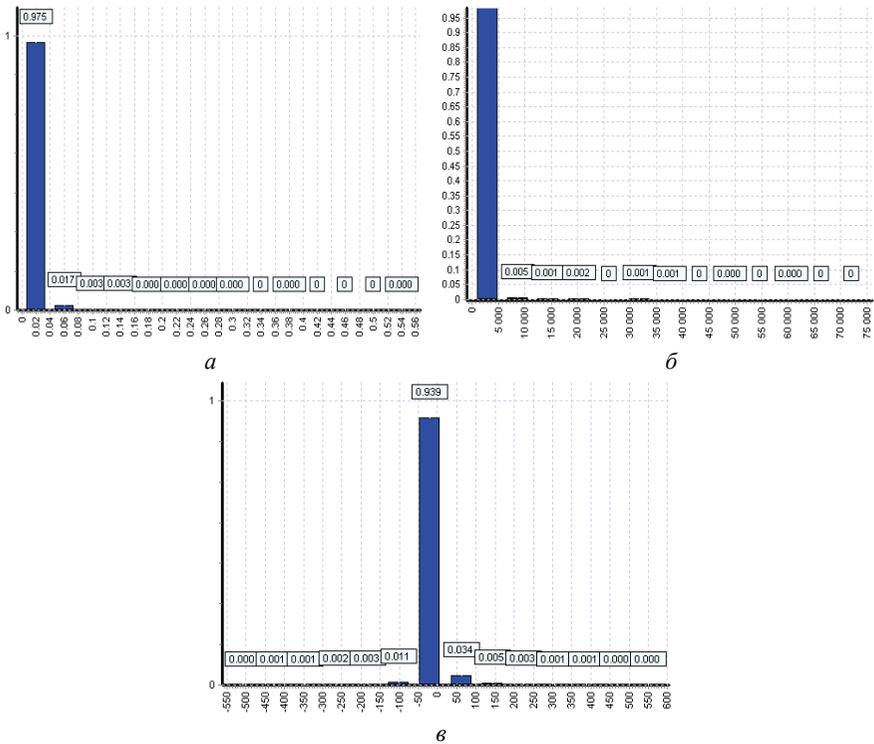


Рисунок 2 – Гистограммы эмпирического распределения для трех диагностических критериев, полученные по результатам эксплуатационных испытаний без предварительной обработки: *а* – гистограмма эмпирического распределения  $C_2H_4$ ; *б* – гистограмма эмпирического распределения отношения  $C_2H_4/C_2H_6$ ; *в* – гистограмма эмпирического распределения скорости нарастания  $C_2H_4$

Последнее обстоятельство существенно ограничивает возможность ис-

пользование факторного анализа при формировании однородных массивов данных. Использование же неоднородных массивов не позволяет оценить закон распределения случайной величины, что иллюстрирует рис. 2.

На рисунке приведены гистограммы эмпирического распределения для трех диагностических критериев, полученные по результатам эксплуатационных испытаний без предварительной обработки. Данные гистограммы построены по результатам хроматографического анализа по Донецкой, Луганской, Полтавской, Сумской, Харьковской областям, Украины. Всего проанализированы результаты наблюдений по 426 трансформаторам, негерметичного исполнения, напряжением 110 и 330 кВ общим объемом 54658 значений. Как видно из рисунков за счет небольшого числа признаков, с аномально высокими значениями гистограммы вырождаются практически в один столбец, что не позволяет выполнить оценку закона распределения. Приведенный пример иллюстрирует необходимость разработки алгоритма для статистического анализа результатов ХАРГ.

В результате исследований, выполненных на кафедре «Передача электрической энергии» НТУ ХПИ был разработан трехэтапный алгоритм статистической обработки результатов ХАРГ. Ниже приводится описание каждого из этапов статистической обработки.

**Предварительная обработка данных.** На первом этапе выполняется расчет численных значений отношений пар газов и скоростей нарастания, а также производится предварительная обработка данных не требующая использования статистических критериев и основанная на некоторых допущениях.

Как показал анализ, для газов углеводородного ряда, растворенных в масле трансформаторов негерметичного исполнения, наибольшую вероятность появления имеют концентрации, которые имеют значения ниже предела обнаружения хроматографа. Известно [7], что чувствительность обнаружения концентраций газов хроматографом находится на уровне  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  % об. Как правило, в картах хроматографического анализа значения ниже предела обнаружения обозначаются как «0» либо «отсутствует». Как отмечается в [1, 2], суммарная погрешность анализа, при значениях концентраций газов углеводородного ряда – 10 мкл/л (0,001 % об.), может достигать 50 %. Систематическая погрешность измерения концентраций газов, растворенных в масле, может достигать 19,7 % [7] и растет по мере приближения концентраций к порогу чувствительности хроматографа. Таким образом, наличие большого числа концентраций ниже и близких к порогу чувствительности хроматографа приводит не только к искажению гистограмм эмпирического распределения (см. рис. 2), но и является источником погрешности результатов ХАРГ. В работах [3, 4] предлагается заменить значения концентраций ниже порога чувствительности хроматографа значением чувствительности хроматографа. Но, такая замена принципиально не изменит форму эмпириче-

ского распределения и кроме того значения реальных концентраций могут значительно отличаться от значения нижнего предела хроматографа. Для определения граничных концентраций растворенных в масле газов и для оценки средних рисков область минимальных концентраций представляет незначительный интерес. Важно выявить площадь пересечения законов распределения для бездефектных и дефектных состояний трансформаторов. В бездефектных трансформаторах эта площадь смещена в область с высокими значениями концентраций газов. Поэтому при исследовании законов распределений концентраций газов, концентрации ниже порога чувствительности хроматографа, не учитывались.

При анализе *отношений пар газов*, расчет их значений выполнялся, только, если концентрации двух газов в паре превышали порог чувствительности хроматографа. То есть если концентрация хотя бы одного из газов была ниже порога чувствительности хроматографа, то данное отношение исключалось из выборки.

Аналогичный подход использовался и для предварительной обработки значений *скоростей нарастания газов*. Если значение концентрации газов было ниже или на уровне своего порога обнаружения, то рассчитанное значение скорости нарастания будет еще дальше от реального значения, чем его концентрация. В связи с этим скорость нарастания газов рассчитывалась только при условии, что в соседних замерах концентрации газов превышали чувствительность хроматографа.

**Оценка однородности диагностических критериев по каждому отдельному трансформатору.** Основным отличием предлагаемого алгоритма статистической обработки результатов ХАРГ, от приведенных в литературных источниках, является оценка однородности диагностических критериев по каждому отдельному трансформатору.

Выполненный анализ показал, что значения диагностических критериев, для одних и тех же газов, для одного и того же трансформатора, полученные в разные моменты времени могут отличаться на несколько порядков. Что вполне объяснимо учитывая случайный характер изменения нагрузки и воздействия аварийных режимов работы электрических сетей. Особенно это характерно для негерметичных трансформаторов, для которых формирование качественного и количественно состава газов происходит не только за счет их новообразования, но и за счет диффузии газов из масла в атмосферу. Данное обстоятельство затрудняет количественную оценку газосодержания в масле, т.к. для этого необходимо знать величину скорости диффузии газов, которая будет существенно отличаться при различной температуре масла и окружающей среды для трансформаторов различной конструкции. По сути, обнаруживаемые в любой из моментов времени концентрации газов в масле негерметичного оборудования отображают разницу между скоростями новообразования газов и их диффузии в атмосферу, а рост концентраций этих га-

зов может существенно отставать действительных скоростей газообразования. Диффузия газов из основного объема масла атмосферу зависит от степени растворимости газов в масле, которая, в свою очередь, различна для отдельных газов и изменяется с изменением температуры. Что в конечном итоге и приводит к неоднородности результатов ХАРГ.

Для выделения однородных значений диагностических критериев в каждом отдельном трансформаторе был использован подход, основанный на выделении грубых промахов из числа однотипных измерений. Учитывая, что вид закона распределения неизвестен и может отличаться от нормального закона, то для выделения грубых промахов, был использован статистический критерий Ирвина.

Для этого для каждого отношения, по каждому трансформатору строился вариационный ряд, и оценивались сомнительные значения на одном или обоих краях ряда. Для чего вычислялось расчетное значение критерия Ирвина:

$$\eta_{\text{расч}} = \frac{(x_k - x_{k \text{ пред}})}{S}, \quad (1)$$

где  $x_k$  – подозрительное значение;  $x_{k \text{ пред}}$  – предыдущее значение в вариационном ряду.

Полученное расчетное значение критерия Ирвина сравнивают с табличным  $\eta_{\text{табл}}$ , значения которого обычно находят из соответствующей таблицы. Если  $\eta_{\text{расч.}} > \eta_{\text{табл.}}$ , то рассматриваемое значение отбрасывают и проверяют следующее.

**Формирование однородных массивов данных.** Для того чтобы, результаты измерений по отдельным трансформаторам, можно было объединить в один массив данных, должно выполняться условие о принадлежности этих данных одной генеральной совокупности. При этом отдельные выборки должны подчиняться одному закону распределения, иметь равные математические ожидания и дисперсию. Для проверки трех статистических гипотез были использованы три критерия.

**Ранговый критерий Уилкоксона** служит для проверки однородности двух независимых выборок:  $x_1, x_2, \dots, x_{n_1}$  и  $y_1, y_2, \dots, y_{n_2}$ . Достоинство этого критерия [8] состоит в том, что он применим к случайным величинам, распределения которых неизвестны; требуется лишь, чтобы величины были непрерывными. Если выборки однородны, то считают, что они извлечены из одной и той же генеральной совокупности и, следовательно, имеют одинаковые, причем неизвестные, непрерывные функции распределения  $F_1(x)$  и  $F_2(x)$ . Таким образом, нулевая гипотеза состоит в том, что при всех значениях аргумента (обозначим его через  $x$ ) функции распределения равны между собой:  $F_1(x) = F_2(x)$ . Конкурирующими являются следующие гипотезы:  $F_1(x) \neq F_2(x)$ ,

$F_1(x) < F_2(x)$ ,  $F_1(x) > F_2(x)$ . Принятие конкурирующей гипотезы  $H_1$ : означает, что  $X > Y$ . Действительно, неравенство  $F_1(x) < F_2(x)$  равносильно неравенству  $P(X < x) < P(Y < x)$ . Отсюда легко получить, что  $P(X > x) < P(Y > x)$ . Другими словами, вероятность того, что случайная величина  $X$  превзойдет фиксированное действительное число  $x$  больше, чем вероятность случайной величине  $Y$  оказаться большей, чем  $x$ ; в этом смысле  $X > Y$ . Аналогично, если справедлива конкурирующая гипотеза  $H_1: F_1(x) > F_2(x)$ , то  $X < Y$ .

Проверка однородности результатов ХАРГ, полученных для двух трансформаторов, непараметрическим тестом Уилкоксона выполнялась в следующей последовательности:

1. Основная гипотеза  $f(x) = f(y)$ , то есть значения диагностических критериев независимы и одинаково распределены.
2. Каждому элементу присваивался ранг (порядковый номер элементов случайных величин  $x$  и  $y$  в общем вариационном ряду).
3. Далее проводилось ранжирование значений временного ряда по убыванию.
4. Ряд делился на два равных участка (или объем первой выборки меньше чем второй) и для каждого из них определялась сумма рангов.
5. Критериальная статистика:

$$w_j = \sum_{i=1}^{n_j} r_i, \quad (2)$$

где  $w_1$  – сумма рангов первой половины общего вариационного ряда объемом  $n_1$ ;  $w_2$  – сумма рангов второй половины общего вариационного ряда объемом  $n_2$ ;  $n_1 + n_2 = n$ .

6. Статистика сравнения:  $w_{1кр}$  и  $w_{2кр}$  – процентные точки, %, с уровнями  $\left(\frac{\lambda}{2} \cdot 100\right)$  и  $\left(p + \frac{\lambda}{2}\right)$ .
7. Правило принятия гипотезы  $H_0$ : гипотеза  $H_0$  отвергается, если  $w_1 < w_{кр}$  и  $w_2 > w_{кр}$ .

**Z - критерий на равенство математических ожиданий.** Требуется по выборочным средним при заданном уровне значимости  $\alpha$  проверить нулевую гипотезу, состоящую в том, что генеральные средние (математические ожидания) рассматриваемых совокупностей равны между собой, то есть

$$H_0 : M(X) = M(Y).$$

Учитывая, что выборочные средние являются несмещенными оценками генеральных средних, то есть  $M(\bar{X}) = M(X)$  и  $M(\bar{Y}) = M(Y)$ , нулевую гипотезу можно записать так:

$$H_0 : M(\bar{X}) = M(\bar{Y}).$$

Проверка равенства математических ожиданий диагностических критериев, выполнялась в следующей последовательности [8]:

1. Основная гипотеза  $M(\bar{X}) = M(\bar{Y})$ , то есть математические ожидания диагностических критериев для двух сравниваемых трансформаторов равны;
2. Учитывая, что вид закона распределения неизвестен и может отличаться от нормального, то в качестве критерия для проверки нулевой гипотезы примем случайную величину:

$$Z'_{\text{набл}} = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{D_{\text{в}}(X)}{n} + \frac{D_{\text{в}}(Y)}{m}}}, \quad (3)$$

где  $\bar{x}$  и  $\bar{y}_1$  – выборочные значения математических ожиданий;  $D_{\text{в}}(X)$  и  $D_{\text{в}}(Y)$  – выборочные значения дисперсий;  $n$  и  $m$  – объемы сравниваемых выборок.

3. Статистика сравнения:  $Z_{\text{крит}}$  определяется по таблице функции Лапласа, по равенству:

$$\Phi_{z_{\text{крит}}} = \frac{(1 - \alpha)}{2}.$$

4. Правило принятия гипотезы  $H_0$ : гипотеза  $H_0$  отвергается, если  $|Z_{\text{набл}}| > z_{\text{крит}}$ , если  $|Z_{\text{набл}}| < z_{\text{крит}}$ , то нет оснований отвергать нулевую гипотезу.

**Критерий Фишера – Снедекора на равенство дисперсий.** По независимым выборкам с объемами, соответственно равными  $n_1$  и  $n_2$ , найдены выборочные дисперсии  $S_X^2$  и  $S_Y^2$ . Требуется при заданном уровне значимости  $\alpha$  проверить нулевую гипотезу, состоящую в том, что генеральные дисперсии рассматриваемых совокупностей равны между собой:

$$H_0 : D(X) = D(Y).$$

Учитывая, что исправленные дисперсии являются несмещенными оценками генеральных дисперсий [8], то есть

$$M[S_X^2] = D(X), \quad M[S_Y^2] = D(Y),$$

нулевую гипотезу можно записать так:

$$H_0 : M[S_X^2] = M[S_Y^2].$$

В качестве критерия проверки нулевой гипотезы о равенстве генеральных дисперсий примем отношение большей дисперсии к меньшей, то есть случайную величину

$$F = \frac{S_{\text{б}}^2}{S_{\text{м}}^2}. \quad (4)$$

Величина  $F$  при условии справедливости нулевой гипотезы имеет распределение Фишера – Снедекора со степенями свободы  $k_1 = n_1 - 1$  и  $k_2 = n_2 - 1$ , где  $n_1$  – объем выборки, по которой вычислена большая исправленная дисперсия;  $n_2$  – объем выборки, по которой найдена меньшая дисперсия.

Проверка результатов ХАРГ на равенство дисперсий производилось в следующей последовательности:

1. Основная гипотеза  $D(X) = D(Y)$ ;
2. Критериальная статистика:  $F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \sim F_{(n_1-1);(n_2-1)}$ .
3. Статистика сравнения:  $F_{(n_1-1);(n_2-1); 0,95}$
4. Правило принятия гипотезы  $H_0$ : гипотеза  $H_0$  отвергается, если  $F > F_{(n_1-1);(n_2-1); 0,95}$ .

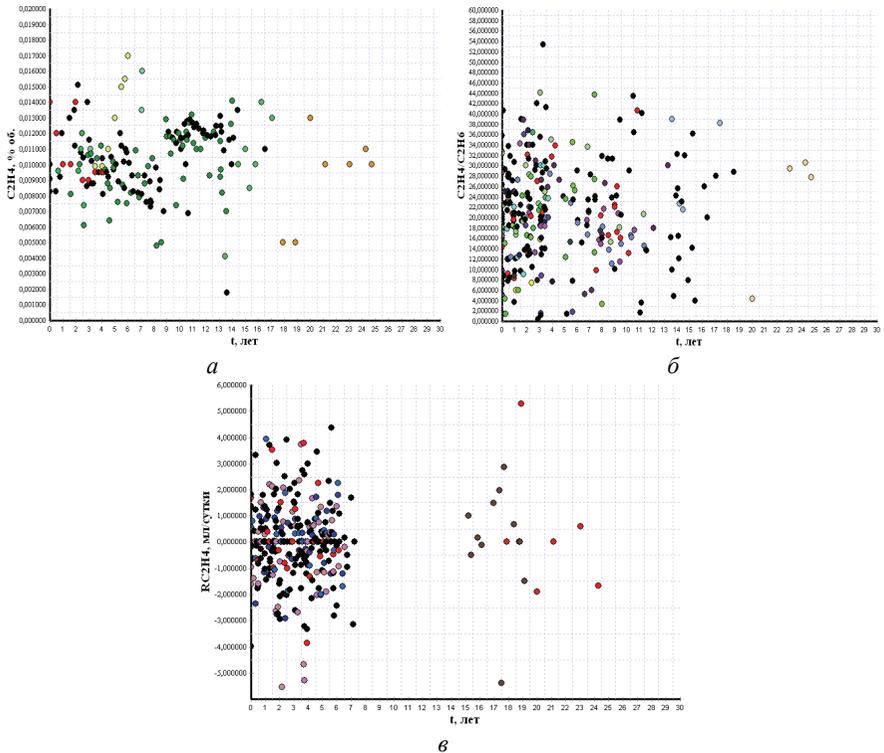


Рисунок 3 – Зависимости диагностических критериев для интерпретации результатов ХАРГ от длительности эксплуатации для однородных массивов: а – концентрации  $C_2H_4$ ; б – отношения  $C_2H_4/C_2H_6$ ; в – скорость нарастания  $C_2H_4$

Формирование однородных массивов диагностических критериев осуществлялось путем попарного сравнения, диагностических критериев по всем трансформаторам, для этого использовалась авторская программа «ODNORODN» [9]. Две выборки объединялись в один массив если:

1.  $S_1 > S_{n1, n2, 0,025}$ ,  $S_2 < S_{n1, n2, 0,975}$  – тест  $W$ ;
2.  $Z_{набл} < Z_{крит, 0,95}$  – тест  $Z$ ;

3.  $F < F_{(n_1-1), (n_2-1), 0,95}$  – тест  $F$ .

В качестве примера, на рис. 3 приведены однородные массивы, полученные в результате статистической обработки трех диагностических критериев с помощью программы «ODNORODN».

Объем выборочных значений  $N$ , значения математического ожидания  $M_x$ , дисперсии  $D_x$ , а также коэффициентов асимметрии и эксцесса  $j_a$  и  $j_e$  для представленных на рис. 3 массивов данных приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Статистические характеристики однородных массивов растворенных в масле газов

Критерий	$N$	$M_x$	$D_x$	$j_a$	$j_e$
$C_2H_4$	173	0,0103	0,000005	-0,350	4,071
$C_2H_4/C_2H_6$	298	20,786	90,480	0,172	2,956
$RC_2H_4$	300	0.0235	2.625	0.0627	4.944

**Исследование законов распределения.** Анализ законов распределения диагностических критериев, используемых для интерпретации результатов ХАРГ, выполнялся в следующей последовательности.

Эмпирические данные ранжировались по возрастанию.

Определялись параметры 16 законов распределения, диагностических критериев, по эмпирическим данным, для чего использовались метод моментов и метод максимального правдоподобия [8, 9].

Определялся полигон эмпирических частот [8, 9]. Для определения числа интервалов использовалась формула Старджеса:

$$m = \log_2(n+1) = 3,31 \lg n + 1, \quad (5)$$

где  $m$  – число интервалов;  $n$  – объем выборочных значений.

Рассчитывались теоретические частоты исходя из полученных ранее параметров законов распределения;

Выполнялась проверка на схожесть эмпирического и теоретического распределения по двум статистическим критериям.

Критерий Пирсона  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}, \quad (6)$$

где  $n_i$  – значение эмпирических частот;  $n'_i$  – значение теоретических частот.

Для проверки основной гипотезы вычисляется выборочное значение критерия  $\chi^2$  и по таблице критических точек распределения критерия  $\chi^2$ , по заданному уровню значимости  $\alpha$  и числу степеней свободы  $k$  находят критическую точку  $\chi^2_{\text{крит}}(\alpha; k)$ .

Число степеней свободы  $k$  определяется по равенству

$$k = s - 1 - r,$$

где  $s$  – число групп (частичных интервалов) выборки;  $r$  – число параметров

предполагаемого распределения, которые оценены по данным выборки.

Если расчетное значение критерия  $\chi^2$  меньше критического, то основная гипотеза не отвергается. Если расчетное значение критерия  $\chi^2$  больше критического, то основная гипотеза отвергается.

Критерий Колмогорова-Смирнова.

$$D_n = \max \left| \tilde{F}(X) - \tilde{F}_{\text{mod}}(X; \bar{\Theta}) \right|, \quad (7)$$

где  $D_n$  – степень различия между распределениями  $\tilde{F}(X)$  и  $\tilde{F}_{\text{mod}}(X; \bar{\Theta})$ ;  $X$  – разряды, по которым рассчитываются различия;  $\tilde{F}(X)$  – эмпирическое распределение  $X$ ;  $\tilde{F}_{\text{mod}}(X; \bar{\Theta})$  – теоретическое распределение  $X$ .

В качестве  $\psi_{\text{крит.}}$  используется функция вида

$$\psi_{\text{крит}} = \sqrt{n \cdot D_n} = \sqrt{n} \cdot \max \left( \tilde{F}(X) - F_{\text{mod}}(X; \bar{\theta}) \right).$$

Значение  $\psi_{\text{расч}}$  определяется из выражения подстановкой значений  $n$  и  $D_n$  для конкретных эмпирических данных. Если выполняется условие

$$\psi_{\text{расч}} < \psi_{\text{крит. верх}},$$

то гипотеза о согласии эмпирического распределения и модельного не отвергается.

Приведенный алгоритм реализован в виде программы «ZR» [9], разработанной на кафедре «Передача электрической энергии» НТУ «ХПИ». Программа позволяет в режиме on-line, выполнить проверку на соответствие 16 законов распределения см. рис. 4.

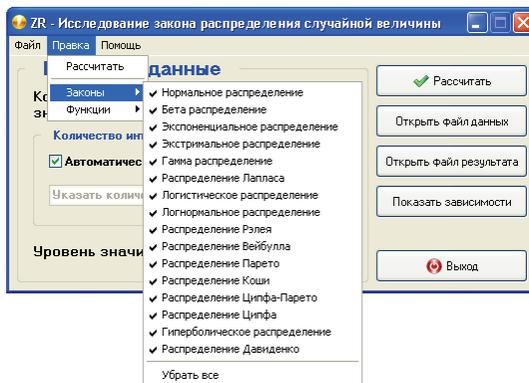


Рисунок 4 – Диалоговое окно программы «ZR», для выбора законов распределения

Значения параметров законов распределения, а также расчетные и критические значения (при  $\alpha = 0,05$ ) критериев Пирсона и Колмогорова-Смирнова для представленных на рис. 3 массивов данных приведены в табл. 2.

Как видно из таблицы для всех трех диагностических критериев, рас-

четные значения критерия согласия Пирсона и критерия Колмогорова не превышают критические. На основании чего можно сделать вывод о том, что нет оснований для того, чтобы отвергнуть гипотезу о приемлемости закона распределения Вейбулла для концентраций растворенных в масле газов и отношений пар газов, а также распределения Лапласа для скоростей нарастания газов. На рис. 5 приведены гистограмма эмпирического распределения и функция плотности распределения законов Вейбулла и Лапласа для трех диагностических критериев.

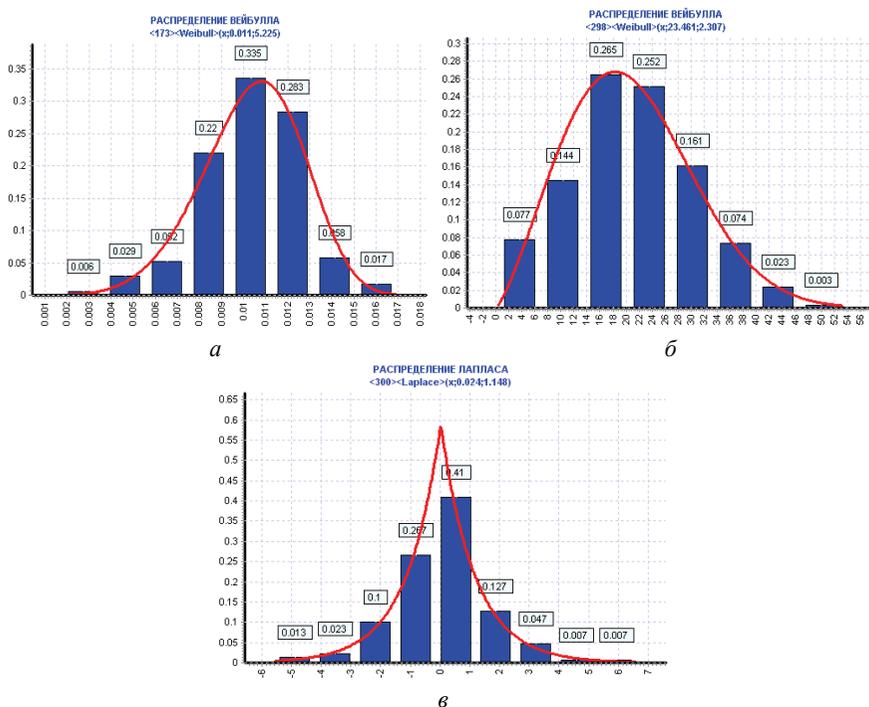


Рисунок 5 – Гистограммы эмпирического распределения и функции плотности распределений законов Вейбулла и Лапласа диагностических критериев, используемых для интерпретации результатов ХАРГ: а – концентрации  $C_2H_4$ ; б – отношения  $C_2H_4/C_2H_6$ ; в – скорость нарастания  $C_2H_4$

Таким образом, разработанный трехэтапный алгоритм статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний, позволяет выполнить оценку законов распределения диагностических критериев для интерпретации результатов ХАРГ даже в условиях нечеткости и неопределенности исходной, измерительной информации.

Таблица 2 – Значения параметров закона распределения диагностических критериев

Критерий	Параметры закона распределения Вейбулла		Значение критерия Пирсона			Значение критерия Колмогорова-Смирнова	
	$\alpha$	$\beta$	$f$	$\chi^2_{\text{расч.}}$	$\chi^2_{\text{крит.}}$	$\lambda_{\text{расч.}}$	$\lambda_{\text{крит.}}$
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,01127	5,225	2	2,873	5,990	0,333	1,360
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	23,461	2,306	4	5,389	9,490	0,778	1,360
Критерий	Параметры закона распределения Лапласа		Значение критерия Пирсона			Значение критерия Колмогорова-Смирнова	
	$\alpha$	$\beta$					
RC <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,023573	1,147649	4	2,886	9,490	0,600	1,360

**Выводы.** Неоднородность результатов ХАРГ, обусловленная как объективными (различия в конструкции, сортах масла, условиях эксплуатации и т.д.), так и субъективными (различный уровень организации и квалификации персонала) не позволяет выполнить оценку законов распределения, без предварительной статистической обработки.

Наличие большого числа концентраций газов, имеющих значения ниже и близких к порогу чувствительности хроматографа приводит не только к искажению гистограмм эмпирического распределения, но и является источником погрешности результатов ХАРГ, что необходимо учитывать при статистической обработке.

Установлено, что значения диагностических критериев, для одних и тех же газов, для одного и того же трансформатора, полученные в разные моменты времени могут отличаться на несколько порядков. В связи с этим ошибочно считать; результаты ХАРГ, полученные в результате наблюдений по одному трансформатору, «априори» однородными.

Формирование массивов с однородными значениями диагностических критериев, должно выполняться при условии сходства законов распределений, равенства математические ожиданий и дисперсий отдельных выборок, полученных для разных трансформаторов.

Предложен трехэтапный алгоритм статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний, который позволяет выполнить оценку законов распределения диагностических критериев для интерпретации результатов ХАРГ даже в условиях нечеткости и неопределенности исходной, измерительной информации.

**Список литературы:** 1. Діагностика маслonaповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. – К.: 2007. – 92 с. 2. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле: РД 153-34.0-46.302-00. – Офиц. изд. М.: НЦ ЭНАС, 2001. – 28 с. 3. Давиденко И.В., Комаров В.И. Применение методов математической статистики для получения критериев оценки состояния трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов / И.В. Давиденко, В.И. Комаров // Электро: Производственно-технический журнал. – 2003. – № 1. – С. 37-41. 4. Давиденко И.В.

Определение допустимых значений контролируемых параметров маслонаполненного оборудования на основе массива наблюдаемых данных / *И.В. Давиденко* // *Электричество*. – 2009. – № 6 – С. 10-21. **5.** *Чупак Т. М., Южанников А.Ю.* Оценка состояния трансформатора на основе золотого сечения // *Фундаментальные исследования*. – 2006. – № 9 – С. 10-21. **6.** *Захаров А.В.* Обнаружение дефектов силовых маслонаполненных трансформаторов как процедура проверки статистических гипотез / *А. В. Захаров* // *Новое в российской энергетике*. – 2001. – № 2 – С. 19-28. **7.** *Давиденко И.В.* Критерии оценки технического состояния маслонаполненных вводов и измерительных трансформаторов по скорости роста концентраций растворенных газов // *Сб. докладов научно-практической конференции специалистов Сибири и Востока «Диагностика электрических установок»*. Новосибирск: ГЦРО, 2009 г. С. 57-68. (ISSN 978-5-93889-106-7); **8.** *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов / *В. Е. Гмурман*. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с. **9.** *Шутенко О.В., Баклай Д.Н.* Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных : Учеб. пособие для вузов / *О. В. Шутенко, Д.Н. Баклай*. – Х.: НТУ «ХПИ», 2013. – 268 с.

*Надійшла до редакції 29.10.2013*

УДК 621.314

**Особенности статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний при исследовании законов распределения результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов / О. В. Шутенко, Д. Н. Баклай** // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 136-150. – Бібліогр.: 6 назв.

У статті запропоновано трьохетапний алгоритм статистичної обробки результатів експлуатаційних випробувань, який дозволяє виконати оцінку законів розподілу діагностичних критеріїв для інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів. Дано опис статистичних критеріїв, які використовуються для формування однорідних масивів даних. Наведені приклади досліджень законів розподілу трьох діагностичних критеріїв, які використовуються для інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів.

**Ключові слова:** хроматографічний аналіз, відносини пар газів, часткові розряди, дефект що розвивається.

This article proposes a three-step algorithm for statistical analysis of the results of operational tests, which allows you to evaluate the laws of distribution of the diagnostic criteria for interpreting the results of chromatographic analysis of dissolved gases in the oil A description of the statistical criteria used for the formation of homogeneous data massives of given. The examples of studies of the laws of distribution of three diagnostic criteria used to interpret the results of chromatographic analysis of dissolved gases in the oil of are.

**Keywords:** cchromatographic analysis, attitudes pairs of gases, partial discharges, developing defect.

**О. Г. ЮЩЕНКО**, канд. фіз.-мат. наук., професор, НТУ «ХПІ»;  
**Д. Ю. ПЕРЕПЕЛИЦЯ**, спеціаліст, НТУ «ХПІ»;  
**Д. І. ШИМКО**, магістр НАУ

## ИНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ САД ЖОЛОБКОВОГО ХВИЛЕВОДУ

Предложена экспертная система автоматизированного проектирования конструкции желобкового волновода. Электродинамическое моделирование осуществлялось модифицированным МЧО, верифицированным экспериментально.

**Ключевые слова:** экспертная система, желобковый волновод, САД.

**Вступ.** Технології штучного інтелекту є ефективним засобом радикального вдосконалення телекомунікаційних систем взагалі [1,2], та їх елементної бази, зокрема [3-6]. Це пов'язано з тим, що штучний інтелект моделює творчі процеси природи [7], як на рівні генетичної оптимізації, так і на – нейромережової обробки інформації, та дозволяє формалізувати знання провідних експертів в конкретній предметній області.

**Аналіз літератури та постановка задачі дослідження.** Тривалий час розробка телекомунікаційних систем міліметрового діапазону стримувалась відсутністю ефективної технології масового виробництва елементної бази і його стандартизації та ліцензування. За останні декілька років ці недоліки були подолані, і в діапазонах 60 ГГц та E (71–76, 81–86 та 92–95 ГГц), спостерігається інноваційний бум, пов'язаний з розробкою систем надшвидкісної та надширокопasmової передачі інформації [8].

Традиційний інтерес до жолобкових хвилеводів (ЖВ) обумовлений рекордно низьким погонними втратами в НВЧ-КВЧ діапазонах, технологічністю виготовлення, великою граничною потужністю енергії, що передається; він може стати основою для розробки новітніх хвилеводних компонентів: атенуаторів, фазообертачів, спрямованих відгалужувачів, фільтрів, антен і ін. [9,10]. Ключова особливість жолобкового хвилеводу, що визначає його основні електродинамічні властивості і практичну значимість – це проміжне положення в класифікації відкритих і закритих електродинамічних систем.

**Електродинамічна модель.** В теоретичному плані електродинамічний аналіз напіввідкритих систем пов'язаний з рішенням складних крайових задач математичної фізики. Серед багатьох математичних моделей найбільш сприятливою виявляється модифікований метод Трефтца, що дає можливість виключати особливі точки на інтервалі зшивання модових базисів та отрима-

ти безкінечні системи лінійних алгебраїчних рівнянь другого роду, що швидко сходяться [7]. В рамках такого підходу нами були знайдені дисперсійні рівняння для Н- та Е мод жолобкового хвильоводу [9,10], та формули для розрахунків межевої потужності та погонних втрат; теоретичні результати підтверджені експериментальними дослідженнями. Далі ми наведемо розрахункові данні для енергетичних параметрів ЖХ, які отримані на основі цитованих теоретичних результатів, та запропонуємо експертну систему, що дозволяє автоматизувати оптимізацію конструкції ЖХ відповідно до технічних вимог користувача.

### 1 Залежність електричних параметрів від геометрії

На рис. 2-3 наведено розрахункові значення вказаних енергетичних параметрів жолобкових хвильоводів, з позначеннями, що зображені на рис. 1.

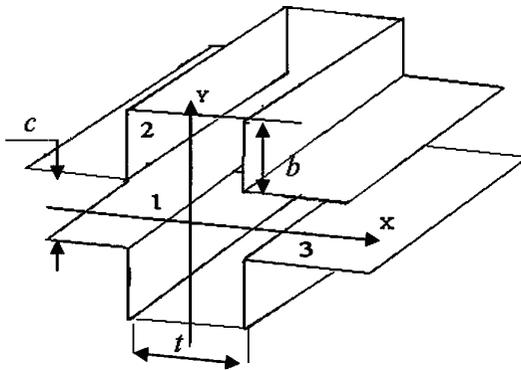


Рисунок 1 – Геометрія жолобкового хвильоводу

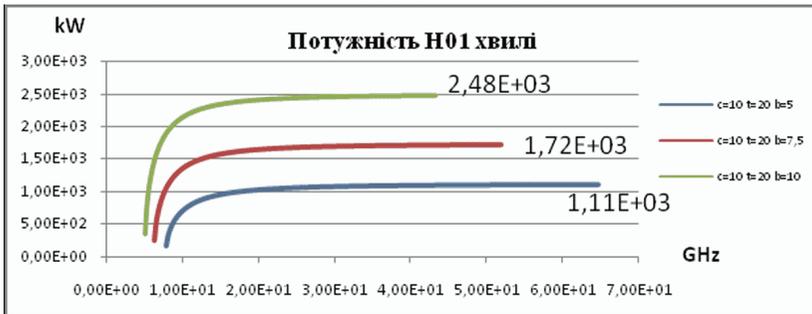


Рисунок 2 – Залежність максимальної потужності хвилі  $H_{01}$  від геометрії жолобкового хвильоводу

Як ми бачимо, наведені залежності є функціями від геометрії хвильоводу, що ускладнює процес оптимізації його профілю відповідно технічних умов

розробки. До того ж, як свідчить досвід, одні й ті ж електричні параметри можуть бути досягнутими при різноманітних сполученнях геометричних розмірів, але, при цьому, інші електричні параметри будуть суттєво відрізнятися; тому виникає необхідність автоматизувати процес оптимізації геометрії хвилеводу сучасними засобами штучного інтелекту. Додамо, що фізичний хист динаміки розрахованих залежностей наведено в публікаціях [9,10], і зараз ми на них не зосереджуємося.

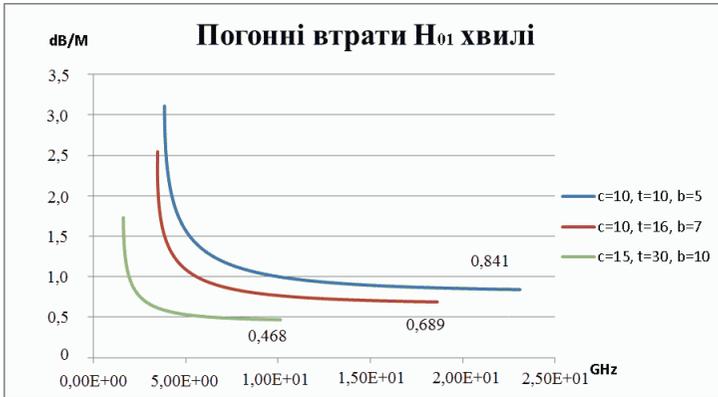


Рисунок 3 – Залежність рівня згасання хвилі Н<sub>01</sub> від геометрії жолобкового хвилеводу

## 2 Обґрунтування і вибір засобу проектування системи керування БД

Будь-яка система, направлена на збереження значного обсягу даних потребує використання системи управління їх базами (СУБД). На сьогоднішній день одна з найпопулярніших є СУБД SQLite, це невелика бібліотека, яка містить вбудовані налаштування, та не вимагає установки «движку» SQL бази даних. Особливості SQLite:

- Нульова конфігурація – не потрібна установка, настройка або адміністрування.
- Вся база даних зберігається в одному файлі.
- Файли баз даних можуть спільно використовуватися різними «машинами».
- Дозволяє зберігати великі обсяги даних. Підтримуються бази даних розміром більше 2 терабайт.
- Малий розмір коду файлів: менше 250 кб для повної конфігурації або менше 150 кб з вимкненими опціями.
- Просте, легке у використанні API.
- Доступно, як один вихідний файл, який можна легко впровадити в інший.

Усе це робить SQLite оптимальною для реалізації завдання оптимізації конструкції жолобкового хвилеводу (рис. 6).

При написанні програми були використані як стандартні бібліотеки Vog-

land Delphi, так і бібліотека компонентів, сполучення яких забезпечило зручний і інтуїтивно зрозумілий користувальницький інтерфейс. У якості системи представлення знань було обрано продукційну модель [11-13,6], яка ілюструється наступними правилами (російською):

«1. Расчет рабочих значений»:

**«Если,»**

- в БД найдено значение соответствующее введенной частоте, **«То,»**
- выбор соответствующих значений  $c, b, t$  из БД, **«Else.»**
- Расчет значений.
- Занесение значений в БД.
- Выбор значений из БД.

«2. Расчет лямбд – рабочей и критической»:

**«Если,»**

- задан коэффициент «смещения» от критической частоты, **«То,»**
- Расчет рабочей лямбды.
- Расчет критической лямбды.

**«Else.»**

- Вывод сообщения об отсутствии входных данных

«3. Расчет критических значений».

**«Если,»**

- в БД найдено значение, соответствующее критическому значению лямбда, **«То,»**
- Выбор соответствующих значений  $c, b, t$  из БД, **«Else. «**
- Расчет значений.
- Занесение значений в БД.
- Выбор значений из БД.

«4. Вывод значений на форму».

**«Если,»**

- значения соответствуют  $t$  и  $n$  string (для вывода в поля для результатов), **«То,»**
- Вывод значений, **«Else.»**
- Перевод значений из Float/Integer в String .
- Вывод значений».

### **3 Розробка алгоритму**

Блок-схема експертної системи зображена на рис. 4. Виходячи із заданого алгоритму розрахунку критичного значення  $\lambda$  був написаний програмний код за обраною мовою програмування (Borland Delphi). Спочатку з бази даних вибирається значення, відповідне до введеної частоти. Далі обчислюється критичне значення та геометричні параметри ЖХ:  $c, b, t$ , що відповідають йому. Вихідними даними для БД є розрахунки робочих діапазонів  $H_{01}$  та  $E_{11}$  хвиль, рівень погонного загасання та максимальний рівень потужності. Був обраний певний діапазон вхідних даних для розрахунків, щоб формувати ве-

лику вибірку значень. Після розрахунків допоміжними програмами всіх визначених значень були сформовані файли, які пізніше були занесені в БД. Якщо в БД не має релевантної до конкретного запиту інформації, то «запускається» відповідна програма розрахунку, та база доповнюється.

#### 4 Блок-схема експертної системи

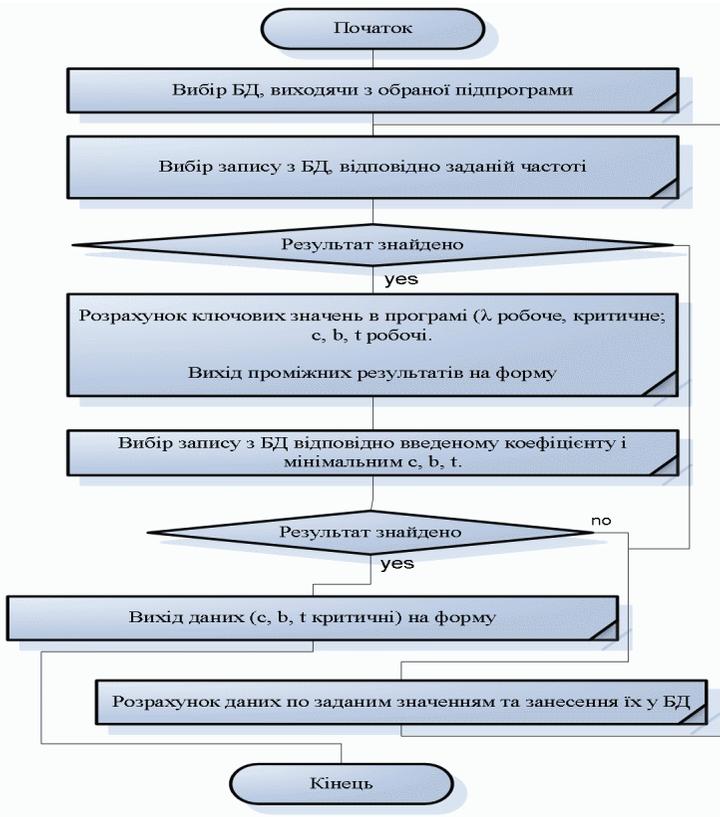


Рисунок 4 – Блок-схема експертної системи

#### 5 Робота інтелектуальної програми

Програма вибирає потрібну інформацію із БД, виходячи з вибору користувачем відповідної підпрограми (рис. 6), будь то розрахунок геометрії ЖХ відповідної до: частоти хвилі  $E_{11}$  (рис. 7) або  $H_{01}$  (рис. 8), мінімального рівня погонного згасання (рис. 9) або максимального рівня потужності хвилі (рис. 10). Далі слідує вибір запису з БД, що відповідає заданій частоті. Після того, як результат знайдено проводиться розрахунок значень у програмі. По завершенню розрахунків відбувається виведення проміжних результатів на фор-

му.

У результаті вибирається запис з БД відповідної введеному коефіцієнту (задає «зміщення» робочого діапазону від критичної частоти) і мінімальних (технологічних) параметрів хвилеводу:  $c$ ,  $b$ ,  $t$ , та здійснюється виведення кінцевих результатів на екранну форму.

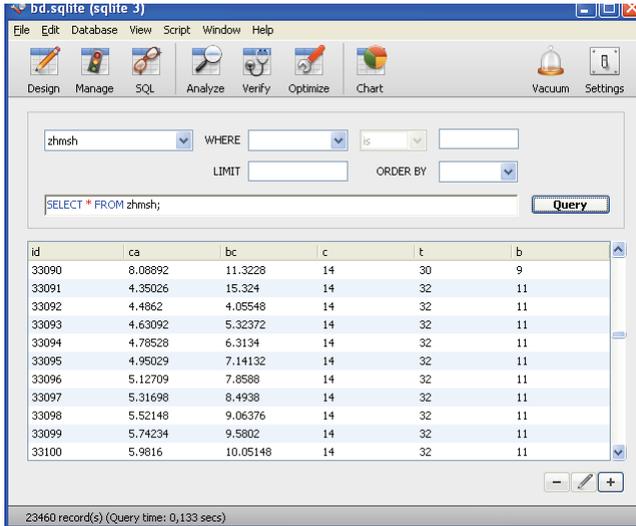


Рисунок 5 – Зберігання даних розрахунків критичної частоти в базі SQLite

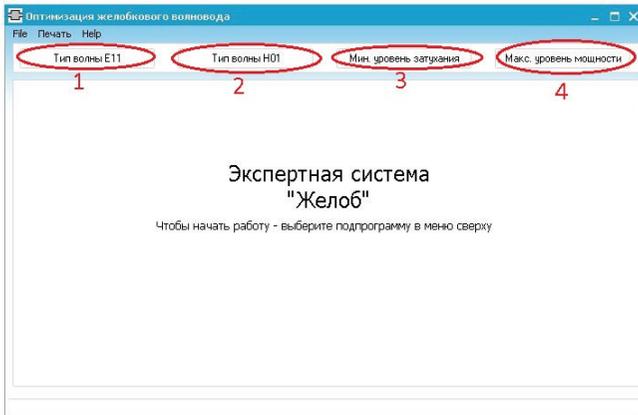


Рисунок 6 – Экранна форма ЕС

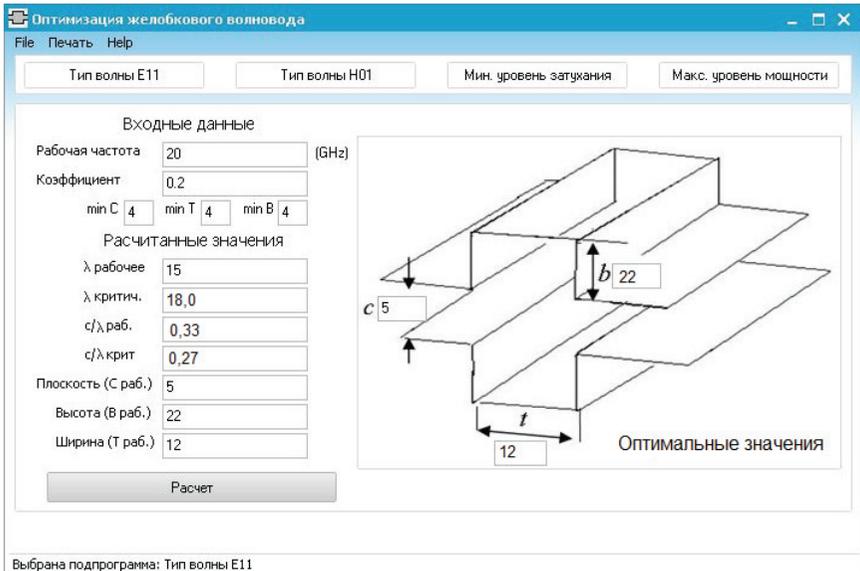


Рисунок 7 – Геометрія жолобкового хвилеводу відповідна до робочої частоти хвилі  $E_{11}$

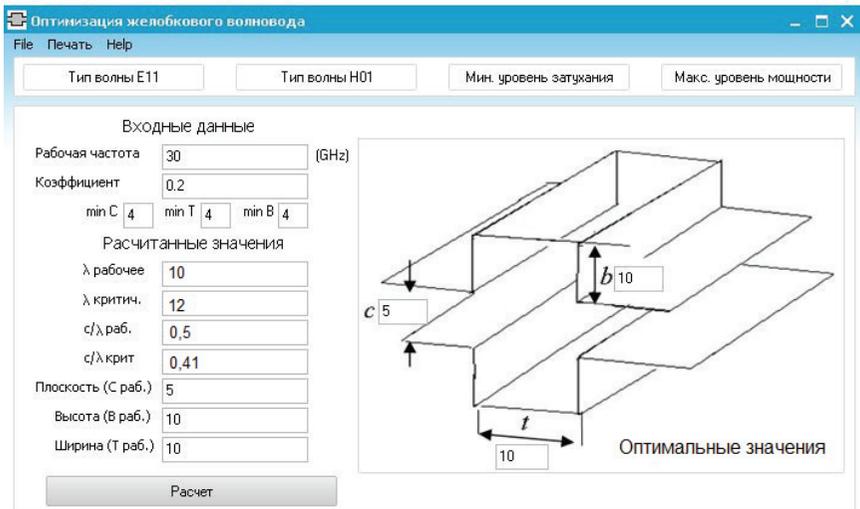


Рисунок 8 – Геометрія жолобкового хвилеводу відповідна до робочої частоти хвилі  $H_{01}$

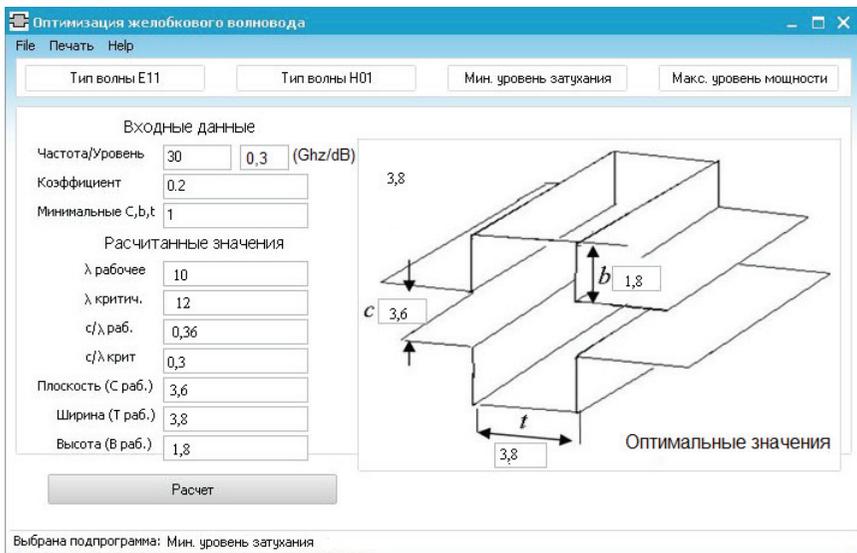


Рисунок 9 – Геометрія жолобкового хвилеводу відповідна до робочої частоти та мінімального рівня погонних втрат хвилі  $H_{01}$

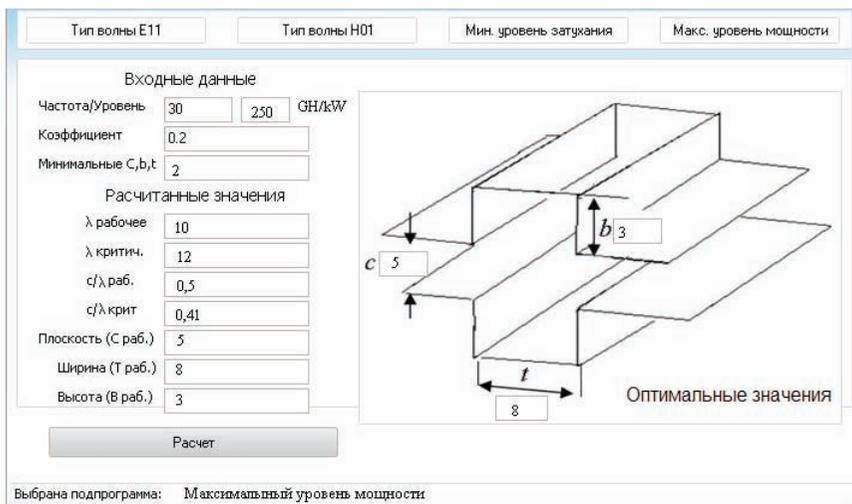


Рисунок 10 – Геометрія жолобкового хвилеводу відповідна до робочої частоти та максимального рівня потужності хвилі  $H_{01}$

## 6 Тестування програмного забезпечення

Тестування створеного програмного продукту відбувалося шляхом виявлення помилок у базі розрахункових даних. До процедур, що тестувалися відносяться:

- процедура ручного введення даних;
- підпрограми розрахунку даних;
- виявлення дефектів в інтерфейсах та у взаємодії між компонентами програми.

Перевірка правильності роботи зазначених процедур здійснювалася за допомогою відладчиків, вбудованих у середовище розробки Borland Delphi [13].

## 7 Висновки

Таким чином, на прикладі жолобкового хвилеводу було показано як засобами штучного інтелекту вирішуються питання оптимального конструювання елементної бази телекомунікаційних систем. В цілому, результати роботи дозволяють розробникам новітньої техніки міліметрового діапазону раціонально обрати робочу моду та розрахувати геометрію жолобкового хвилеводу в залежності від вимог щодо мінімальних погонних втрат та максимального рівня потужності, що передається.

**Список літератури:** 1. *Агеев Д. В.* Проектирование современных телекоммуникационных систем // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 4/2 (46). – С. 75-77. 2. *Cohen M.A., Grossberg S.* Absolute stability of global pattern formation and parallel memory storage by competitive neural networks // IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. – 1983. – V. 13, № 5. – P. 815-826. 3. *R. Thabet, M. L. Riabi* Design of Metallic Cylindrical Waveguide Bandpass Filters Using Genetic Algorithm Optimization // Progress in Electromagnetics Research Symposium Abstracts. – Moscow, 18-21 August 2009. – PP. 785-786. 4. *M. Yahia, J. W. Tao, H. Benzina, M. N. Abdelkrim,* Ridged Waveguide Filter Optimization Using the Neural Networks and a Modified Simplex Method // International Journal of Innovation, Management and Technology. – 2010. – Vol. 1, № 3. – PP. 259-263. 5. *K. Humayun* Advanced Neural Network Modeling Techniques for Efficient CAD of Microwave Filters // Carleton University, Ottawa, 2009. 6. *A. Yushchenko, D. Mamedov, D. Zaytsev* Intellectual CAD for Three-Tier Wide Band WDR Filters // Wireless Engineering and Technology. – 2012. – Vol. 3, № 1. – PP. 30-35. 7. *A.G. Yushchenko* Physical and Mathematical Aspects of Some Mode Matching Method Modifications // ММЕТ. – Kharkov: 2000. – Vol. 2. – PP. 494-496. 8. *В.Вишневицкий, С. Фролов, И.Шахнович* Миллиметровый диапазон как промышленная реальность. Стандарт IEEE 802.15.3с и спецификация WirelessHD // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – № 3. 9. *A.G. Yushchenko, S.F. Shibalkin* Electrodynamical Modeling of Waveguide Properties of the Transmission Lines Based on Planar Waveguide Splitters // IR&MMwaves. – 1994. – Vol. 15, № 11. – PP. 1937-1965. 10. *О.Г. Ющенко, С.Ф. Шибалкин, В.С. Мірошніченко* Теоретичне та експериментальне дослідження жолобкової лінії передачі // Зв'язок. – 2007. – № 4. 11. *Гаврилова Т. А., Хорошевський В. Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем. – С-Пб.: Питер, 2000. – 382 с. 12. *Іванов Ю., Парацук І.* Експертні системи при проектуванні телекомунікації // Журнал Мобільні системи. – 2007. – Вип. 11. – С. 60-62. 13. *Частиком А. П., Гаврилова Т. А., Белов Д. Л.* Розробка експертних систем. – С-Пб.: БХВ-Петербург, 2003. – 608 с. [http://en.wikipedia.org/wiki/C\\_standard\\_library](http://en.wikipedia.org/wiki/C_standard_library).

*Надійшла до редакції 28.10.2013*

УДК 621.396.6: 007:159.955:519.768

**Інтелектуальний САД жолобкового хвилеводу / О.Г. Ющенко, Д.Ю. Перепелиця, Д.І. Шимко // Вісник НТУ «ХПІ».** Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 151-160. – Бібліогр.: 13 навз.

Запропоновано експертну систему автоматизованого проектування конструкції жолобкового хвилеводу. Електродинамічне моделювання виконане за використанням модифікованого МЧО, який верифіковано експериментально.

**Ключові слова:** експертна система, жолобковий хвилевод, CAD

A knowledge based CAD system of groove guide design has been developed. Modified mode matching method of electrodynamics modeling was used, which was proved by an experimental data.

**Key words:** knowledge based CAD system, groove guide design

УДК 620.179

**S. SHEVCHENKO**, Ph. D., professor, NTU «KhPI»;

**O. OKUN**, Ph. D., assistant, NTU «KhPI»;

**V. VOLOKHIN**, Ph. D., senior lecturer, Sumy State University

## **THE METHOD OF REDUCING THE INTENSITY OF MAGNETIC FIELD OUTSIDE HIGH VOLTAGE POWER SUBSTATIONS**

В данной работе рассматриваются теоретические методы уменьшения магнитного поля за пределами подстанций высокого напряжения. Было показано, что чередование фаз проводов соседних ошинок влияет на снижение интенсивности магнитного поля за пределами подстанций высокого напряжения, и эти меры могут быть реализованы на стадии проектных работ, не требуя дополнительных затрат для их реализации.

**Ключевые слова:** электромагнитные процессы, воздействие на людей и окружающую среду, системы защиты, шины электропитания, подстанции высокого напряжения, последовательность фаз.

**Introduction.** It is known [1] that 50-Hz frequency magnetic fields produced inside (for personal) and outside (for population) the territory of high voltage (HV) power substations located in city areas do not reach the exposure limits specified by Ukrainian regulations (1750  $\mu\text{T}$ ) [2], the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection guidelines (200  $\mu\text{T}$  and 1000  $\mu\text{T}$ ) [3], and the proposed European Union Directive (1000  $\mu\text{T}$ ) [4].

The newly proposed limit will be 0,5  $\mu\text{T}$  [5], and as such, some power objects may not comply with this limit value. This fact indicates a possible exceedance of the new regulations outside HV substations located in city areas. Therefore, investigation of measures to reduce the values of MFs at the design stage of power objects is an important task.

© S. Shevchenko, O. Okun, V. Volokhin, 2013

**Problem statement.** Typical power substations have multilayer and multicell arrangement of busbar wires; thus, it is certainly incorrect to consider a single cell or a single horizontal layer. However, for the purpose of identifying patterns, it is acceptable to introduce simplifications that allow an investigator to separately consider a layer, a cell, or several cells in a two dimensional form. Thus, the essence is not lost.

Theoretical studies of MF were performed for common types of 110/10 kV substations in Ukraine. Dimensions of the busbar wires of this substation are taken based on typical projects. This study, adopted the following dimensions:

- the distance between cells of the HV switchgear was 9 m;
- the distance between the wires of the HV busbars was 2,5 m;
- the average suspension height of the upper layer HV busbars was 11,2 m;
- the average suspension height of the lower layer HV busbars was 3,6 m;
- the distance between the wires of the low voltage (LV) busbars was 1 m;
- the average suspension height of the LV busbars was 3 m.

Currents in the busbar wires are specified in accordance with [6] for one of the three variants of the setting, i.e., the currents in HV wires are adopted as  $I_C = 210 \text{ A}$ ,  $I_B = -105 \text{ A}$ ,  $I_A = -105 \text{ A}$ , and  $I_C = 2300 \text{ A}$ ,  $I_B = -1150 \text{ A}$ ,  $I_A = -1150 \text{ A}$  for the LV wires. Arrangement of phases is from the left to right («C-B-A»). The height  $h$  of the observation points is 2 m. A busbar wire is considered as a system of parallel linear currents over a flat earth. Each phase is calculated separately, and finally, the total field  $B$  is summed as a square root of the sum of the horizontal and vertical components squared.

**Main results of the research.** Table 1 shows the results of calculation of MF produced by HV busbar wires, given in Figure 1, under the different suspension heights  $H$  and the distance between the wires  $d$ .

Table 1 – Comparison of variants of reducing MFs by changing suspension height and phase-to-phase distance of HV switchgear busbar wires

Parameters of busbar wires (Figure 1)	$B$ , $\mu\text{T}$ at distance $x$ from projection of middle phase wire («B»), m			
	0	20	40	60
$d = 2,5 \text{ m}, H = 11,2 \text{ m}$	1,74	0,34	0,10	0,04
$d = 1 \text{ m}, H = 11,2 \text{ m}$	0,99	0,19	0,05	0,02
$d = 5 \text{ m}, H = 11,2 \text{ m}$	1,82	0,40	0,11	0,05
$d = 2,5 \text{ m}, H = 8 \text{ m}$	1,47	0,34	0,09	0,04
$d = 2,5 \text{ m}, H = 13 \text{ m}$	1,29	0,29	0,08	0,04
$d = 2,5 \text{ m}, H = 3,6 \text{ m}$	1,74	0,34	0,10	0,04

Table 2 shows the results of MF calculations produced by HV and LV busbar wire configurations, given in Figure 2, under the different wire dimensions ( $a$ ,  $b$ ,  $d$ ).

Table 3 shows the results of MF calculations produced by LV busbar wire

configurations, given in Figure 1, under the different suspension heights  $H$  and the distance between the wires  $d$ .

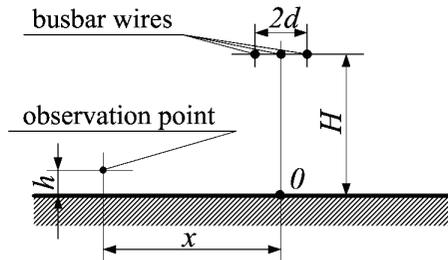


Figure 1 – Scheme of HV and LV busbar wire locations ( $H$  is the suspension height;  $h$  is the height, and  $x$  is the distance from the point of observation;  $d$  is the distance between the busbar wires)

Table 2 – Comparison of variants of reducing MFs by changing horizontal phase arrangement of HV and LV busbar wires into triangular construction

Parameters of busbar wires (Figure 2)	$B, \mu T$ at distance $x$ from projection of middle phase wire («B»), m			
	0	20	40	60
horizontal: $d = 2,5$ m, $H = 11,2$ m	1,74	0,34	0,10	0,04
equilateral triangular: $d = 2,5$ m, $H = 11,2$ m, $a = \sqrt{3}/2 \cdot d$ , $b = 1,25$ m	0,99	0,19	0,05	0,02
equilateral triangular: $d = 5$ m, $H = 11,2$ m, $a = \sqrt{3}/2 \cdot d$ , $b = 2,5$ m	1,82	0,40	0,11	0,05
triangular: $d = 3,5$ m, $H = 11,2$ m, $a = 2,5$ m, $b = 0,5$ m	1,47	0,34	0,09	0,04
triangular: $d = 3$ m, $H = 11,2$ m, $a = 2,45$ m, $b = 0,5$ m	1,29	0,29	0,08	0,04

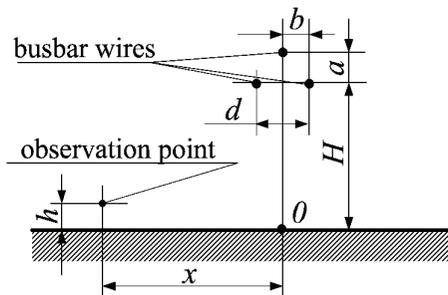


Figure 2 – Scheme of HV and LV triangular busbar wire locations ( $H$  is the suspension height;  $h$  is the height, and  $x$  is the distance from the point of observation;  $a$ ,  $b$ , and  $d$  are the parameters of busbar wires)

Table 3 – Comparison of variants of reducing MFs by changing suspension height and phase-to-phase distance of LV switchgear busbar wires

Parameters of busbar wires (Figure 1)	$B, \mu\text{T}$ at distance $x$ from projection of middle phase wire («B»), m			
	0	20	40	60
$d = 1 \text{ m}, H = 3 \text{ m}$	363,66	1,75	0,43	0,19
$d = 0,6 \text{ m}, H = 3 \text{ m}$	310,44	1,04	0,26	0,11
$d = 1,4 \text{ m}, H = 3 \text{ m}$	360,14	2,48	0,61	0,27
$d = 1 \text{ m}, H = 2,5 \text{ m}$	663,42	1,76	0,43	0,19
$d = 1 \text{ m}, H = 3,5 \text{ m}$	217,49	1,75	0,43	0,19

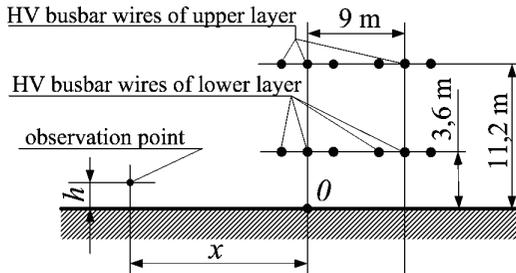


Figure 3 – Scheme of HV busbar wire locations of two neighboring cells (3.6 m is the height of the lower layer HV busbars; 11.2 m is the height of the upper layer HV busbars; 9 m is the distance between neighboring cells;  $h$  is the height, and  $x$  is the distance from the point of observation)

From Table 1-3, it can be concluded that decreasing the distance between phases, increasing the suspension height, and alternating the arrangement of the HV and LV busbar conductors comprise one of effective measures that allows us to reduce the intensity of MFs (as well as electric fields) generated inside and outside the territory of a substation. However, the possibility of an effective application of these solutions is limited by some requirements associated with providing safety and the convenience of repair works. Additionally, there is an additional barrier to implementation concerning the complication of tower construction and consequently, an increase in cost. Based on these facts, the measures that are related to the phase sequence alternation of HV and LV busbars are especially important.

Table 4 shows the results of MF calculations produced by HV busbar wire configurations of one cell given in Figure 3, under the different phase sequence and current directions.

It is clearly seen from Table 4 that the worst configuration of the cells, in respect to MFs generated far away from sources of the field, is that in which upper and lower layer currents have the same direction.

Table 5 shows the results of MF calculations produced by HV busbar wire configurations of two cells given in Figure 3, under the different phase sequence and current directions.

Table 4 – Comparison of variants of reducing MFs by alternating HV busbar wire phase of one cell («CBA» means positive direction of currents; «cba» is opposite direction)

Phase sequence in busbar wires (Figure 3)	$B$ , $\mu\text{T}$ at distance $x$ from projection of middle phase wire («B»), m			
	0	20	40	60
C B A C B A	21,78	0,70	0,19	0,09
C B A c b a	18,56	0,27	0,04	0,01
C B A -----	1,74	0,34	0,10	0,04
----- C B A	20,16	0,41	0,10	0,04
C B A A B C	18,72	0,26	0,04	0,01
C B A a b c	21,64	0,67	0,19	0,09

Table 5 – Comparison of variants of reducing MFs by alternating HV busbar wire phase of two cells («CBA» means positive current direction; «cba» is opposite direction)

Phase sequence in busbar wires (Figure 3)	$B$ , $\mu\text{T}$ at distance $x$ from projection of middle phase wire («B»), m			
	0	20	40	60
C B A C B A -----	2,01	0,51	0,16	0,08
C B A C B A C B A C B A	19,25	1,06	0,32	0,15
C B A C B A C B A -----	21,46	0,88	0,26	0,12
----- C B A C B A	17,96	0,61	0,17	0,08
C B A C B A c b a c b a	24,33	0,35	0,06	0,02
C B A A B C -----	2,02	0,18	0,03	0,01
----- C B A A B C	21,99	0,23	0,04	0,01
C B A A B C C B A A B C	24,01	0,37	0,07	0,02
C B A A B C c b a a b c	19,97	0,19	0,02	0,01

Table 6 presents the results of MF calculations produced by LV busbar wire configurations of two cells given in Figure 4, under the different phase sequence and current directions.

A substation during normal operation mode is usually characterized by 2, 3, 4

variants that are favorable for environmental conditions outside the territory of substations. Variant 1 is possible only for a small number of substations and only in specific operation modes.

Thus, the location of phase conductors and current directions in a single cell in normal operation mode of the substation provides the lowest MF values. For this reason, alternating the phase of one cell is not effective. However, when designing substations, one should pay attention to the MF created by the currents of outer cells, and if it is possible, avoid the same direction of the currents (power) in any section of a cell, especially in the outer cells.

From Table 5, it is seen that when we have the same direction of currents in neighboring cells (standard phasing), the MF produced by a single cell is strengthened due to an additional field produced by currents with the same direction in busbar conductors of neighboring cells that are located at a distance of 9 m. When we have the opposite direction, the effect of reducing the resulting MF is achieved through partial compensation of the field produced by a single cell, using the field produced by the currents flowing in opposite directions in the phase conductors of neighboring cells.

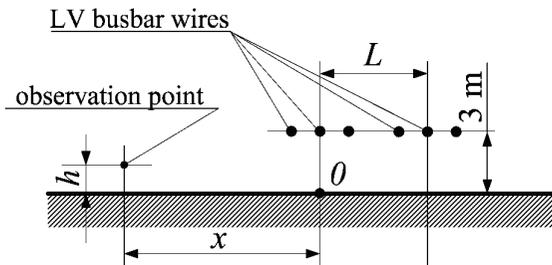


Figure 4 – Scheme of two neighboring LV busbar wire locations (3 m is the suspension height of the LV busbars;  $L$  is the distance between neighboring cells;  $h$  is the height, and  $x$  is the distance from the point of observation)

Thus, in changing the current phase values of the neighboring cells at the edges of the next cell, i.e., at the limit distance from each other («C-B-A»→A-B-C»), it is possible to obtain a significant (3–5 times) reduction of MF at the distances of 40–60 m from the projection of the wire of the middle phase of the first cell in comparison with the standard phasing.

As it can be noticed from Table 6, 5 variant that means a mirrored arrangement of the phases, and 3 variant with the opposite flowing currents in the phases of the busbar conductors leads to a significant reduction of MFs in comparison with the same direction of the currents. The field reducing multiplicity at the distances of 40–60 meters is 3–4 times. It is important to note that the variant with opposite currents is difficult to put into practice because it requires the installation of additional equipment.

Table 6 – Comparison of variants of reducing MFs by alternating LV busbar wire phase («CBA» means positive current direction; «cba» is opposite direction)

Phase sequence in busbar wires (Figure 4)	$B, \mu\text{T}$ at distance $x$ from projection of middle phase wire («B»), m			
	0	20	40	60
$L = 9$ m C B A C B A	354,87	2,58	0,72	0,34
$L = 5$ m C B A C B A	334,54	2,87	0,78	0,36
$L = 9$ m C B A c b a	372,45	0,92	0,15	0,05
C B A	363,66	1,75	0,43	0,19
$L = 9$ m C B A A B C	371,82	0,94	0,15	0,05

Therefore, since the measures related to changing the phase and suspension height spacing are also hard to implement, the only rational measures to reduce MFs produced by LV busbar is changing the phase sequence by removing current values of the neighboring cells at the edges in the next LV busbar wires, i.e., at the limit distance from each other («C-B-A»–«A-B-C»).

A comparison of different possible measures to limit the MF outside HV power substations allowed us to identify and choose measures that do not require a significant cost for implementation. They are as follows:

1) the phase sequence alternation («C-B-A»–«A-B-C») of HV busbar wires of two neighboring cells;

2) the phase sequence alternation («C-B-A»–«A-B-C») of two neighboring LV busbar wires at the sector from power transformers to the close type switchgear;

3) the combined application of the first and second measures, i.e., the phase sequence alternation («C-B-A»–«A-B-C») of HV busbar wires in two neighboring cells and two neighboring LV busbar wires.

The listed measures were used to demonstrate the possibility of MF reduction in the example of a 110/10 kV power substation made according to the «two blocks of line-transformer» scheme. A process development of a three-dimensional simulation model and studies of MFs at this power substation have been extensively discussed and presented in [1,6].

The results of applying measures to reduce the field at the considered power substation are summarized in Table 7.

As it can be seen from Table 7, implementation of the proposed measures allows us to significantly reduce values of magnetic flux density outside the territory of the power substation (for example, field value at the distance of 30 m from the substation's fence was lower in 4,4 times under the phase alternation of the HV and LV busbar wires together) and to restrict the area to 0.1–1  $\mu\text{T}$  values in comparison with standard phasing adopted in normal operation mode.

Table 7 – Magnetic flux density values under different measures applied to the «two blocks of line-transformer» substation of 110/10 kV

Measure	$B$ , $\mu\text{T}$ (at 20 m distance from the substation's fence)	$B$ , $\mu\text{T}$ (at 30 m distance from the substation's fence)
without applying any measures (normal operation mode)	0,20	0,15
phase alternation of HV busbar wires	0,16	0,11
phase alternation of LV busbar wires	0,11	0,08
phase alternation of HV and LV busbar wires together	0,07	0,03

**Conclusion.** Comparison of different possible measures of reducing MFs generated outside HV power substations has shown that decreasing the distance between phases, increasing the suspension height, and alternating the arrangement of the HV and LV busbar conductors comprise one of the effective measures that reduces the intensity of EMFs generated inside and outside the territory of a substation; but, the possibility of an effective application of these solutions is limited due to an increase in cost to its practical implementation.

The most effective measures that can be implemented at the design stage and do not require an additional cost for implementation are the phase sequence alternation of HV busbar wires of two neighboring cells, the phase sequence alternation of two neighboring LV busbar wires at the sector from power transformers to the close type switchgear, the combined application of the phase sequence alternation of HV busbar wires in two neighboring cells and two neighboring LV busbar wires. Implementation of the proposed measures for limiting MF generated outside the 110/10 kV power substation significantly reduces values of magnetic flux density in comparison with standard phasing adopted in normal operation mode.

**References:** 1. *O. Okun, S. Shevchenko and L. Korpinen* A comparison of magnetic fields inside and outside high voltage urban 110kV power substations with the exposure recommendations of the Ukrainian Regulatory Authorities // Radiation Protection Dosimetry. Advance Access published October 15, 2012, doi:10.1093/rpd/ncs268. 2. The Ukrainian State Sanitary Norms and Rules while Working with Sources of Electromagnetic Fields (*Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів*): ДСанНіП 3.3.6.096-2002. Approved by the order of Ministry of Health of Ukraine from 18.12.2002 № 476 [In Ukrainian]. 3. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) // Health Physics. – 2010. – Vol. 99. – № 6. – PP. 818–836. 4. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risk arising from physical agents (electromagnetic fields) (XXth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) // url: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0348:FIN:EN:PDF.>, last accessed: April 01, 2013. 5. *I.S. Varshatova, O.A. Geljarovskaja, N.V. Krjukova, V.S. Lupikov, Ju.D. Rudas and K.A. Savshenko* Prospects of automatic systems application in power substation for their magnetic field compensation // Visnyk NTU «KhPI» (Bulletin of NTU «KhPI»), – 2010. – № 60. – PP. 3–9 [in Russian]. 6. *S. Shevchenko, V. Volokhin, O. Okun* Magnetic field determination of high voltage power substations based on finite element method // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2012. – Vol. 2/4(56). – PP. 35–39 (in Russian).

*Has gone to editorial board 16.09.2013*

**The method of reducing the intensity of magnetic field outside high voltage power substations / S. Shevchenko, O. Okun, V. Volokhin** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 160-168. – Бібліогр.: 6 назв.

This work looks at theoretical methods for reducing the magnetic field generated outside the area of high voltage power substations. It has been shown that changing the construction of busbar wires is an effective measure that facilitates a reduction in the intensity of electromagnetic fields generated inside and outside the area of a substation. The measures connected with the phase sequence alternating of busbar wires can be implemented at the design stage and do not require an additional cost for implementation.

**Keywords:** electromagnetic processes, impact on humans and environment, systems of protection, busbar, high voltage power substation, phase sequence.

В даній роботі розглядаються теоретичні методи зменшення магнітного поля за межами підстанцій високої напруги. Було показано, що чергування фаз проводів сусідніх шин впливає на зниження інтенсивності магнітного поля за межами підстанцій високої напруги, і ці заходи можуть бути реалізовані на стадії проектних робіт, не вимагаючи додаткових витрат для їхньої реалізації.

**Ключові слова:** електромагнітні процеси, вплив на людей і навколишнє середовище, системи захисту, шини електроживлення, підстанції високої напруги, послідовність фаз.

## ЗМІСТ

<i>Баранов М. И.</i> Расчетно-экспериментальное обоснование существования дебройлевских электронных полуволн в металлическом проводнике с импульсным током большой плотности . . . . .	3
<i>Баранов М. И., Рудаков С. В.</i> Усредненные характеристики волнового распределения дрейфующих электронов в металлическом проводнике с импульсным током проводимости большой плотности . . . . .	12
<i>Баранов М. И., Веселова Н. В.</i> Ускорители заряженных частиц «ХФТИ» – средоточие техники и электрофизики высоких и сверхвысоких напряжений . . . . .	21
<i>Барбашова Г. А., Вовченко А. И.</i> Определение давления жидкости в замкнутом цилиндре при высоковольтном электрическом разряде . . . .	31
<i>Борцов А. В., Кузнецова Е. И.</i> Гололедные нагрузки на воздушные линии электропередач . . . . .	38
<i>Глебов О. Ю., Князев В. В., Колиушко Г. М.</i> Определение степени влияния электромагнитных эффектов молнии на оборудование объектов энергетики . . . . .	43
<i>Глебов О. Ю., Колиушко Д. Г., Колиушко Г. М., Пличко А. В.</i> Заземленные устройства защиты от перенапряжений на подстанциях 330/110 кВ . . . . .	51
<i>Колиушко Г. М., Мельников П. Н., Недзельский О. С., Петков А. А., Руденко С. С., Чернухин А. Ю.</i> Влияние конфигурации системы электродов на распределение точек поражения плоскости длинной искрой . . . . .	57
<i>Коробко А. И., Коробко З. И.</i> Испытательный комплекс для исследований воздействия мощных импульсных электромагнитных полей субнаносекундного диапазона на радиоэлектронные системы . . . . .	71
<i>Немченко Ю. С., Князев В. В., Лесной И. П., Сомхивев С. Б., Островерх Т. Н.</i> Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («ввод в заземление») . . . . .	76
<i>Немченко Ю. С., Князев В. В., Лесной И. П., Сомхивев С. Б., Постельник И. А.</i> Генератор ГКП-150М для испытаний технических средств на устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц . . . . .	83
<i>Поштаренко В. М., Андреев А. Ю., Мерсни Амаль</i> Обеспечение качества обслуживания на критических участках мультисервисной сети . . . . .	94

<i>Приходько С. И., Жученко А. С., Волков А. С., Полянскова Н. В.</i> Исследование принципов построения цифровых сетей оперативно–технологической связи железнодорожного транспорта Украины . . . . .	100
<i>Резинкина М. М., Резинкин О. Л., Светличная Е. Е.</i> Электрические параметры длинных проводящих каналов . . . . .	108
<i>Рудаков В. В., Марценюк В. Е., Рудаков С. В.</i> Градирование изоляции высоковольтных импульсных коаксиальных конструкций . . . . .	115
<i>Чернухин А. Ю., Князев В. В., Мельников П. Н.</i> Квазистатическое развитие коронного разряда с молниеприемников . . . . .	122
<i>Шимків М. В., Лисечко В. П., Прогонний О. М., Гуменюк О. М.</i> Метод моніторингу спектру на основі цифрової узгодженої фільтрації . . . . .	127
<i>Шутенко О. В., Баклай Д. Н.</i> Особенности статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний при исследовании законов распределения результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов . . . . .	136
<i>Ющенко О. Г., Перепелиця Д. Ю., Шимко Д. І.</i> Інтелектуальний САД жолобкового хвилеводу . . . . .	151
<i>Shevchenko S., Okun O., Volokhin V.</i> The method of reducing the intensity of magnetic field outside high voltage power substations . . . . .	160

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

**Збірник наукових праць**

Серія:

Техніка та електрофізика високих напруг

№ 60 (1033)

Науковий редактор: д-р техн. наук, проф. В. І. Кравченко  
Технічний редактор: канд. фіз.-мат наук, ст. наук. співр. Л. В. Ваврів

Відповідальний за випуск: канд. техн. наук Г. Б. Обухова

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

Обл.-вид № 40-13.

Підп. до друку 22.11.2013 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,75. Облік.-вид. арк. 10.  
Тираж 300 пр. 1-й завод 1-100. Зам. № 23. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію  
суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.  
61002, Харків, вил 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.

---