

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

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

*Серія: Техніка та електрофізика
високих напруг*

№ 21 (1064) 2014

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2014

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – X. : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 21 (1064). – 189 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. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;

В. В. Єпіфанов, 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. Пуляєв, 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 № 04 від 04 квітня 2014 р.

ISSN 2079-0740

© Національний технічний університет «ХПІ», 2014

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

ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛУВОЛН В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С РАЗНОРОДНЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРОВОДНИКАМИ И ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ

Приведены результаты теоретического исследования изменения параметров электронных полувольт де Бройля в случае их распространения в одной электрической цепи вдоль металлических проводников с различными длинами и поперечными сечениями. Показано, что подобная трансформация параметров дебройлевских электронных полувольт касается как их длины, так и ширины «горячих» продольных участков разнородных проводников.

Ключевые слова: электрическая цепь, металлический проводник, дрейфующие электроны, импульсный ток проводимости, электронные полувольты, характеристики продольного волнового распределения свободных электронов.

Введение. Протекание в электрической цепи тока проводимости $i_0(t)$ тех или иных видов (постоянного, переменного и импульсного) различной плотности δ_0 по твердым металлическим проводникам длиной l_0 и поперечным сечением S_0 , как известно, сопровождается распространением в их кристаллической структуре квантованных электронных полувольт де Бройля [1–3]. Причем, применительно к круглым проводникам электрической цепи с током различных амплитудно-временных параметров (АВП) данные дебройлевские полувольты будут распространяться как в их продольном, так и радиальном направлениях [4]. Кроме того, наложение (суперпозиция) этих полувольт будет вызывать появление в структуре указанных проводников волновых электронных пакетов (ВЭП), образующих в проводящем материале проводников макроскопические периодические как продольные, так и радиальные структуры [5]. Характерной особенностью данных волновых структур проводника будет являться наличие в них относительно «горячих» и «холодных» продольных и радиальных участков, температура материала которых может существенно отличаться друг от друга [6]. Физической причиной тому является различная плотность (концентрация) дрейфующих свободных электронов на «горячих» и «холодных» участках проводника с током $i_0(t)$. На «горячих» участках проводника она больше, а на его «холодных» участках она меньше первоначальной усредненной плотности n_{e0} свободных электронов в материале проводника без тока [7]. Вот поэтому в проводящей структуре проводника с током $i_0(t)$ становится возможным формирование неоднородного периодического продольного (радиального) температурного поля, ширина наиболее нагретых зон которого и соответственно ширина «горячих» участков

© М.И. Баранов, 2014

проводника будет определяться величиной плотности тока δ_0 в проводнике [3, 4]. Представленные в [1–7] теоретические и экспериментальные результаты исследований продольного волнового распределения дрейфующих электронов и теплового поля в металлических проводниках с током проводимости различных АВП были получены для однородных проводников, имеющих одинаковые длины l_0 и поперечные сечения S_0 . А каковы будут рассматриваемые электронные распределения для слабо- и сильноточной электрической цепи, содержащей параллельно или последовательно соединенные между собой металлические проводники различной длины и различного поперечного сечения? Прямого ответа на данный электротехнический вопрос электрофизической направленности в ранее опубликованных работах [1–7] не содержится. Именно определенному рассмотрению этой проблемной задачи и посвящена предлагаемая статья.

1. Постановка задачи исследования. Рассмотрим линейную электрическую цепь, содержащую последовательно соединенные между собой два прямолинейных металлических проводника, один из которых имеет длину l_1 и поперечное сечение S_1 , а другой – соответственно длину l_2 и поперечное сечение S_2 . Считаем, что твердый проводящий материал данных проводников обладает свойствами изотропности и линейности. Пусть по рассматриваемым проводникам протекает аксиальный импульсный ток $i_0(t)$, АВП которого удовлетворяют требованиям большого импульсного тока (БИТ) [8]. Принимаем, что с учетом протекания БИТ с заданными АВП по указанным проводникам усредненные величины плотностей токов $\delta_1 = i_0/S_1$ и $\delta_2 = i_0/S_2$ в них могут принимать численные значения до $(1-10)$ кА/мм². Данные значения δ_1 и δ_2 будут определять (вызывать) появление в зоне ВЭП исследуемых проводников таких длин (ширин) «горячих» продольных участков Δz_{z1} и Δz_{z2} в них, численные значения которых могут составлять до $(1-10)$ мм [4,8]. Требуется исследовать возможные изменения параметров квантованных дебройлевских электронных полувольт при их распространении вдоль рассматриваемых металлических проводников, включенных в одну электрическую цепь.

2. Случай последовательного соединения в электрической цепи металлических проводников различной длины и одинакового поперечного сечения. На рис. 1 в схематическом виде приведен рассматриваемый случай, характеризующийся наличием в одной электрической цепи с импульсным током $i_0(t)$ двух последовательно соединенных металлических проводников одинакового поперечного сечения $S_1 = S_2$ и различной длины $l_1 > l_2$. Известно, что квантованные длины $\lambda_{en1}/2$ и $\lambda_{en2}/2$ дебройлевских электронных полувольт в тех или иных металлах исследуемых проводников с током проводимости различных АВП будут выбираться из следующих соотношений [3,4]:

$$\lambda_{en1}/2 = l_1/n; \quad (1)$$

$$\lambda_{en2}/2 = l_2 / n, \quad (2)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, n_m$ – целочисленное значение квантового числа n , имеющего максимальное значение $n_m = 2 n_k^2$; n_k – 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 нашего проводника принадлежит [9].

Из (1) и (2) видно, что на длинах l_1 и l_2 исследуемых проводников с импульсным током проводимости $i_0(t)$ будет всегда укладываться целое квантованное число электронных полувольт де Бройля. Численное значение квантового числа n для них будет определяться энергетическим состоянием свободных электронов в момент приложения к рассматриваемой электрической цепи разности электрических потенциалов (напряжения источника питания).

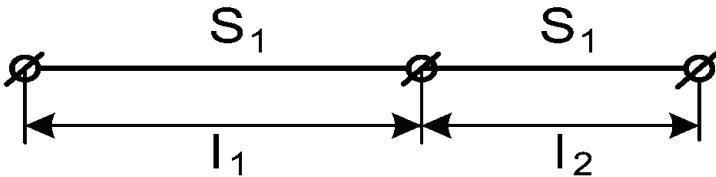


Рисунок 1 – Схематическое изображение последовательного соединения в цепи исследуемых металлических проводников 1 и 2 одинакового поперечного сечения $S_1 = S_2$ и различной длины $l_1 > l_2$ с импульсным аксиальным током $i_0(t)$ большой плотности

В [4] было показано, что усредненное значение \bar{n} для целого квантового числа n можно определять из следующего приближенного соотношения:

$$\bar{n} = (n_m - 1) / (\ln n_m). \quad (3)$$

Для рассматриваемого нами **случая I** возможны два варианта реализации проводников 1 и 2 одинакового сечения $S_1 = S_2$ и различной длины $l_1 > l_2$.

Первый вариант – электропроводящий материал проводников идентичен.

Тогда для усредненных длин $\lambda_{en1}^*/2$ и $\lambda_{en2}^*/2$ продольных электронных полувольт в исследуемых проводниках можно записать следующее соотношение:

$$\lambda_{en1}^*/2 = \lambda_{en2}^*/2 = (l_1 + l_2) / \bar{n}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что для этого варианта случая I трансформации (преобразования) дебройлевских электронных полувольт (волн) при их прохождении в исследуемых проводниках происходить не будет. Эти проводники будут вести себя как единый металлический проводник эквивалентной длины $(l_1 + l_2)$.

Второй вариант случая I предусматривает использование в проводниках 1 и 2 различных электропроводящих материалов. Для данного варианта реализации изучаемых проводников 1 и 2 будут справедливы следующие

расчетные формулы для электронных полувольт (волн) де Бройля в их материалах:

$$\lambda_{en1}^*/2 = l_1 / \bar{n}_1; \quad (5)$$

$$\lambda_{en2}^*/2 = l_2 / \bar{n}_2, \quad (6)$$

где \bar{n}_1, \bar{n}_2 – соответственно усредненные значения целого квантового числа n для проводников 1 и 2 рассматриваемой линейной электрической цепи.

В результате из выражений (3), (5) и (6) для отношения усредненных квантованных длин λ_{en1}^* и λ_{en2}^* электронных волн или полувольт де Бройля в исследуемых разнородных проводниках, выполненных из различных электропроводящих материалов, для одной и той же цепи с током $i_0(t)$ находим:

$$\lambda_{en1}^* / \lambda_{en2}^* = l_1 \bar{n}_2 / (l_2 \bar{n}_1). \quad (7)$$

Воспользовавшись соотношением неопределенностей Гейзенберга [8,9] применительно к локализующимся на «горячих» продольных участках рассматриваемых проводников дрейфующим свободным электронам, для усредненных значений ширин (длин) Δz_{z1}^* и Δz_{z2}^* их «горячих» продольных участков, соответствующих макроскопическим зонам ВЭП металлических проводников с импульсным аксиальным током $i_0(t)$ различных АВП, получаем:

$$\Delta z_{z1}^* = l_1 / (2\pi \bar{n}_1); \quad (8)$$

$$\Delta z_{z2}^* = l_2 / (2\pi \bar{n}_2). \quad (9)$$

Результаты экспериментов по обнаружению и исследованию ВЭП, «горячих» и «холодных» продольных участков в одиночном круглом оцинкованном стальном проводе ($n_k = 4$; $n_m = 32$; $\bar{n} = 9$) длиной $l_0 = 320$ мм и диаметром 1,6 мм ($S_0 = 2,01$ мм²), включенном в разрядную цепь мощной высоковольтной конденсаторной батареи генератора ГИТ-С (зарядное напряжение батареи $U_{3r} = 3,7$ кВ; запасаемая энергия батареи $W_r = 310$ кДж) и испытывающей воздействию аperiodического импульса аксиального тока $i_0(t)$ временной формы 9 мс/576 мс амплитудой $I_{0m} = 745$ А (при амплитуде плотности тока в проводе $\delta_{0m} = I_{0m} / S_0 = 0,37$ кА/мм²) [4,8], подтверждают достоверность расчетных соотношений (8) и (9). Так, в ходе указанных экспериментальных исследований было установлено, что в оцинкованном стальном проводе с используемым в опытах импульсным током большой плотности усредненная ширина (длина) Δz_z^* «горячих» продольных участков составляла около 7 мм [4,8]. Расчетная оценка по соотношениям (8) и (9) численных значений усредненной ширины $\Delta z_z^* = \Delta z_{z1}^* = \Delta z_{z2}^*$ «горячих» продольных участков для указанного стального провода ($l_0 = l_1 = l_2 = 320$ мм; $\bar{n} = \bar{n}_1 = \bar{n}_2 = 9$) с принятым импульсным аксиальным током показывает, что она составляет

около 5,7 мм.

Тогда из (8) и (9) для отношения квантованных ширин «горячих» продольных участков на исследуемых проводниках с принятым током следует:

$$\Delta z_{z1}^* / \Delta z_{z2}^* = l_1 \bar{n}_2 / (l_2 \bar{n}_1). \quad (10)$$

Из (7) и (10) следует, что для второго варианта случая I (применение различных проводящих материалов в проводниках 1 и 2) отношения усредненных длин λ_{en1}^* и λ_{en2}^* дебройлевских электронных волн (полувольт) и усредненных ширин (длин) Δz_{z1}^* и Δz_{z2}^* «горячих» продольных участков в проводниках 1 и 2 оказываются равными одной и той же величине $l_1 \bar{n}_2 / (l_2 \bar{n}_1)$.

Из (7) и (10) вытекает, что в линейной электрической цепи, содержащей последовательно соединенные между собой металлические проводники одинакового поперечного сечения $S_1 = S_2$ из различного электропроводящего материала при их различной длине $l_1 > l_2$, в случае протекания в ней импульсного аксиального тока $i_0(t)$ различных АВП будет наблюдаться определенная трансформация распространяющихся вдоль нее дебройлевских электронных полувольт (волн). Данная трансформация или деформация будет проявляться в виде изменения как длин λ_{en1} (или λ_{en1}^*) и λ_{en2} (или λ_{en2}^*) рассматриваемых электронных волн (полувольт), так и соответственно ширин (длин) Δz_{z1}^* и Δz_{z2}^* «горячих» продольных участков при переходе электромагнитного возбуждения от кристаллической структуры одного из проводников к другому. Причем, эти изменения будут прямо пропорциональны отношению длин l_1/l_2 используемых металлических проводников. В исследуемом проводнике 1 с большей длиной (в нашем случае с длиной $l_1 > l_2$) большими будут и длины $\lambda_{en1} > \lambda_{en2}$ (или $\lambda_{en1}^* > \lambda_{en2}^*$) электронных волн (полувольт) де Бройля, распространяющихся в его кристаллической структуре. При этом в металлическом проводнике 1 с большей длиной $l_1 > l_2$ большими оказываются и ширины $\Delta z_{z1}^* > \Delta z_{z2}^*$ «горячих» продольных участков, периодически возникающих вдоль него во всех зонах его ВЭП макроскопических размеров. Этот теоретический результат имеет важное практическое значение при реализации электровзрывной технологии получения мелкодисперсных проводящих материалов с входящими в их состав микро- и наночастицами, основанной на быстром электрическом взрыве (ЭВ) в газовой или конденсированной средах тонких металлических проводников [10–12]. Данный результат будет способствовать обоснованному выбору для указанной электротехнологии значений длин тонких проводников из различных металлов, используемых при их ЭВ.

3. Случай последовательного соединения в электрической цепи металлических проводников различного поперечного сечения и одинаковой длины. В схематическом виде этот электротехнический случай представлен на рис. 2. Для лучшего понимания применяемого автором методологического подхода при исследовании здесь новых особенностей в волновых распределениях дрейфующих свободных электронов в металлических проводниках необходимо отметить, что используемые нами простейшие соединения рассматриваемых проводников в одной и той же линейной электрической цепи с импульсным током $i_0(t)$ позволяют однозначным и ясным образом выяснить влияние, прежде всего, геометрических параметров этих однородных проводников на характер распределения в них дебройлевских электронных полувольт (волн). Для **случая II** также возможны два варианта реализации применяемых в цепи проводников: **первый вариант** предусматривает использование в проводниках 1 и 2 одинаковых проводящих материалов, а **второй вариант** – различных проводящих материалов. Начнем исследование с первого варианта.

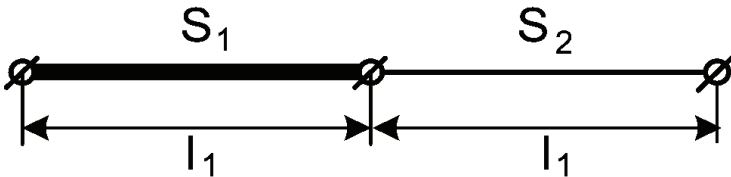


Рисунок 2 – Схематическое изображение последовательного соединения в цепи исследуемых металлических проводников 1 и 2 различного поперечного сечения $S_1 > S_2$ и одинаковой длины $l_1 = l_2$ с импульсным аксиальным током $i_0(t)$ большой плотности

Используя фундаментальное волновое соотношение де Бройля, запишем выражения для усредненных длин $\lambda_{en1}^*/2$ и $\lambda_{en2}^*/2$ продольных электронных полувольт в рассматриваемых разнородных проводниках из идентичного материала одной и той же линейной электрической цепи, приведенной на рис. 2:

$$\lambda_{en1}^*/2 = h/(2m_e v_{en1}^*); \quad (11)$$

$$\lambda_{en2}^*/2 = h/(2m_e v_{en2}^*); \quad (12)$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка [9]; $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя электрона [9]; v_{en1}^* , v_{en2}^* – соответственно усредненные значения квантованных скоростей дрейфа свободных электронов в последовательно соединенных между собой проводниках 1 и 2 различного поперечного сечения.

Известно, что для величин усредненных скоростей v_{en1}^* и v_{en2}^* дрейфа

свободных электронов в изучаемых проводниках 1 и 2 можно записать [8,9]:

$$v_{en1}^* = \delta_{01} / (e_0 n_{e1}); \quad (13)$$

$$v_{en2}^* = \delta_{02} / (e_0 n_{e2}), \quad (14)$$

где δ_{01} , δ_{02} – соответственно плотности импульсного аксиального тока в исследуемых проводниках линейной цепи; $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – модуль электрического заряда электрона; n_{e1} , n_{e2} – соответственно плотности (концентрации) дрейфующих свободных электронов в металлических проводниках.

Так как для рассматриваемого первого варианта случая II $n_{e1} = n_{e2} = n_{e0}$, а $\delta_{01} = i_0 / S_1$ и $\delta_{02} = i_0 / S_2$, то с учетом выражений (11)–(14) для величин минимальных длин $\lambda_{en1}^* / 2$ и $\lambda_{en2}^* / 2$ электронных полувольт де Бройля в металлических проводниках 1 и 2 получаем следующие расчетные соотношения:

$$\lambda_{en1}^* / 2 = e_0 n_{e0} S_1 h / (2 m_e I_{0m}); \quad (15)$$

$$\lambda_{en2}^* / 2 = e_0 n_{e0} S_2 h / (2 m_e I_{0m}). \quad (16)$$

Тогда из (15) и (16) для отношения усредненных длин $\lambda_{en1}^* / 2$ и $\lambda_{en2}^* / 2$ дебройлевских электронных полувольт (волн) в исследуемых разнородных проводниках 1 и 2 одинаковой длины $l_1 = l_2$ и различного сечения $S_1 > S_2$, выполненных из идентичного электропроводящего материала, для одной и той же линейной электрической цепи с импульсным током $i_0(t)$ находим:

$$\lambda_{en1}^* / \lambda_{en2}^* = S_1 / S_2. \quad (17)$$

Для первого варианта случая II (применение одинаковых проводящих материалов в проводниках 1 и 2 различного сечения) на основе применения соотношения неопределенностей Гейзенберга к дрейфующим в проводниках 1 и 2 свободным электронам минимальные усредненные ширины (длины) Δz_{z1}^* и Δz_{z2}^* их «горячих» продольных участков будут описываться выражениями:

$$\Delta z_{z1}^* = e_0 n_{e0} S_1 h / (4 \pi m_e I_{0m}); \quad (18)$$

$$\Delta z_{z2}^* = e_0 n_{e0} S_2 h / (4 \pi m_e I_{0m}). \quad (19)$$

Из (18) и (19) следует, что отношение минимальных усредненных ширин или длин Δz_{z1}^* и Δz_{z2}^* «горячих» продольных участков исследуемых проводников 1 и 2 в рассматриваемом электротехническом случае будет равным:

$$\Delta z_{z1}^* / \Delta z_{z2}^* = S_1 / S_2. \quad (20)$$

Что касается второго варианта случая II (применение различных металлов в проводниках 1 и 2 различного сечения), то аналогично (15) и (16) величины минимальных усредненных длин дебройлевских электронных полувольт

в кристаллических структурах рассматриваемых проводников 1 и 2 будут описываться следующими приближенными расчетными соотношениями:

$$\lambda_{en1}^*/2 = e_0 n_{e1} S_1 h / (2m_e I_{0m}); \quad (21)$$

$$\lambda_{en2}^*/2 = e_0 n_{e2} S_2 h / (2m_e I_{0m}). \quad (22)$$

С учетом (21) и (22) для отношения усредненных длин $\lambda_{en1}^*/2$ и $\lambda_{en2}^*/2$ электронных полуволн де Бройля в проводниках 1 и 2 из различных проводящих материалов и различного поперечного сечения $S_1 > S_2$ получаем:

$$\lambda_{en1}^* / \lambda_{en2}^* = S_1 n_{e1} / (S_2 n_{e2}). \quad (23)$$

Для этого варианта выполнения металлических токонесущих частей исследуемых проводов с учетом (18) и (19) отношение минимальных усредненных ширин (длин) Δz_{z1}^* и Δz_{z2}^* для «горячих» продольных участков в используемых нами проводниках 1 и 2 в электрической цепи примет следующий вид:

$$\Delta z_{z1}^* / \Delta z_{z2}^* = S_1 n_{e1} / (S_2 n_{e2}). \quad (24)$$

Из (23) и (24) видно, что отношения $\lambda_{en1}^* / \lambda_{en2}^*$ и $\Delta z_{z1}^* / \Delta z_{z2}^*$ для рассматриваемых проводников 1 и 2 применительно ко второму варианту случая II их практической реализации описываются одинаковыми соотношениями, равными $S_1 n_{e1} / (S_2 n_{e2})$. В этой связи можно заключить, что при использовании в цепи с током последовательного соединения проводников различного сечения $S_1 > S_2$ будет наблюдаться также определенная трансформация распространяющихся в них электронных полуволн. При этом будут изменяться как их длины $\lambda_{en1}^*/2$ и $\lambda_{en2}^*/2$, так и ширины Δz_{z1}^* и Δz_{z2}^* «горячих» продольных участков проводников 1 и 2. Эти изменения будут прямо пропорциональны отношению сечений S_1 / S_2 проводников. Тем больше сечение проводника в цепи, тем будут большими значения длин $\lambda_{en1}^*/2$ (или $\lambda_{en2}^*/2$) его электронных полуволн и ширин Δz_{z1}^* (или Δz_{z2}^*) его «горячих» участков. Данный результат может найти практическое применение в электровзрывной технологии получения мелкодисперсных проводящих материалов [10–12].

Выводы. Приведенные на основе классической и квантовой электродинамики приближенные расчетные результаты указывают на возможность трансформации (изменения) длин электронных полуволн де Бройля и ширин «горячих» продольных участков в последовательно соединенных разнородных проводниках одной электрической цепи с импульсным током различных АВП.

Список литературы: 1. Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в про-

воднике 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 распределения электрического тока проводимости в проводнике // *Технічна електродинаміка*. – 2007. – № 1. – С. 13–19. **4.** Баранов М.И., Рудаков С.В. Усредненные характеристики волнового распределения дрейфующих электронов в металлическом проводнике с импульсным током проводимости большой плотности // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Зб. наук. праць. Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 12–20. **5.** Баранов М.И. Волновой электронный пакет проводника с электрическим током проводимости // *Електротехніка 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. Основные характеристики вероятностного распределения свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // *Технічна електродинаміка*. – 2008. – № 1. – С. 8–12. **8.** Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – 384 с. **9.** Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с. **10.** Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии / Под ред. В.Н. Карношшина. – Минск: Наука и техника, 1983. – 151 с. **11.** Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. **12.** Баранов М.И. Получение дисперсных материалов с микронными, субмикронными и наноструктурными частицами вещества при электрическом взрыве тонких металлических проводников // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 4. – С. 45–49.

Bibliography (transliterated): **1.** Baranov M.I. Volnovoe raspredelenie svobodnyh jelektronov v provodnike s jelektricheskim tokom provodimosti *Jelektrotehnika*. – 2005. – № 7. – 25–33. **2.** Baranov M.I. Jenergeticheskij i chastotnyj spektry svobodnyh jelektronov provodnika s jelektricheskim tokom provodimosti *Jelektrotehnika*. – 2006. – № 7. – 29–34. **3.** Baranov M.I. Novye fizicheskie podhody i mehanizmy pri izuchenii processov formirovanija i raspredelenija jelektricheskogo toka provodimosti v provodnike *Tehnichna elektrodinamika*. – 2007. – № 1. – 13–19. **4.** Baranov M.I., Rudakov S.V. Usrednennye harakteristiki volnovoogo raspredelenija drejffujushhh jelektronov v metallicheskom provodnike s impul'snym tokom provodimosti bol'shoj plotnosti *Visnyk NTU «HPI»*. Zbirnik naukovih prac'. Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». – H.: NTU «HPI», 2013. – № 60 (1033). – 12–20. **5.** Baranov M.I. Volnovoj jelektronnyj paket provodnika s jelektricheskim tokom provodimosti *Elektrotehnika i elektromehaniika*. – 2006. – № 3. – 49–53. **6.** Baranov M.I. Kvantovomehachieskij podhod pri raschete temperatury nagreva provodnika jelektricheskim tokom provodimosti *Tehnichna elektrodinamika*. – 2007. – № 5. – 14–19. **7.** Baranov M.I. Osnovnye harakteristiki verojatnostnogo raspredelenija svobodnyh jelektronov v provodnike s jelektricheskim tokom provodimosti *Tehnichna elektrodinamika*. – 2008. – № 1. – 8–12. **8.** Baranov M.I. Izbrannye voprosy jelektrofiziki. Tom 2, Kn. 1: Teorija jelektrofizicheskikh jeffektov i zadach. – H.: NTU «HPI», 2009. – 384. **9.** Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki *Otv. red. V.K. Tartakovskij*. – K.: Naukova dumka, 1989. – 864. **10.** Stolovich N.N. Jelektrovzryvnye preobrazovateli jenerгии *Pod red. V.N. Karnjushina*. – Minsk: Nauka i tehniika, 1983. – 151. **11.** Gulyj G.A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij. – K.: Naukova dumka, 1990. – 208. **12.** Baranov M.I. Poluchenie dispersnyh materialov s mikronnymi, submikronnymi i nanostrukturnymi chasticami veshhestva pri jelektricheskom vzryve tonkih metallicheskih provodnikov *Elektrotehnika i elektromehaniika*. – 2012. – № 4. – 45–49.

Надійшла (received) 25.03.2014

Л. З. БОГУСЛАВСКИЙ, канд. техн. наук, зав. отд., ИИПТ НАН Украины, Николаев;

Л. Н. МИРОШНИЧЕНКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев

ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАЦИЯ РАЗНОИМПЕДАНСНЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ В КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЕ ПЫЛЕГАЗООЧИСТКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Обоснована необходимость использования для повышения эффективности систем газоочистки дополнительного разноуровневого импульсного высоковольтного высокочастотного источника питания с дополнительными коронирующими электродами, обеспечивающего пылегазоочистку разноимпедансных газовых выбросов экологически опасных промышленных объектов.

Ключевые слова: электрофильтрация, высоковольтный высокочастотный импульсный источник питания, комплексная система газоочистки, разноимпедансные газовые выбросы.

Введение. Существующие в Украине на данный момент системы электрофильтрации морально устарели. Энергопотребление этих систем в 5-6 раз превосходит аналогичные показатели развитых стран. Действующие газоочистные системы тепловых электростанций и других промышленных объектов при работе на высокозольном топливе не обеспечивают соблюдения европейских нормативных требований по уровню выбросов твердых частиц. Отсутствует очистка от таких вредных газовых выбросов, как NO_x , SO_x , CO_x , превышающих нормы ЕС в тысячи раз.

Для обеспечения европейских норм газовых выбросов в современных условиях (использование на ТЭС бурого угля) необходима разработка способа повышения эффективности работы существующих электрофильтров (ЭФ), который не требует их капитальной реконструкции. Таким способом является применение дополнительных импульсных высокочастотных источников питания, формирующих специальные формы напряжения [1], обеспечивающие как дозарядку разноимпедансной пыли, так и эффективную деструкцию экологически опасных газовых выбросов путем использования стабильных стримерных разрядов в разноимпедансных газовых средах.

Анализ предварительных исследований. Как показали проведенные в ВЭИ им. Ленина под руководством Л. В. Чекалова исследования, высокое удельное электрическое сопротивление ($VЭС$) летучей золы обусловлено как параметрами дымовых газов, так и химическим составом самой золы, главным образом, соотношением в ней алюмосиликатов ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) и щелочных металлов, в первую очередь натрия и лития. При определенной комбинации

этих параметров удельное электрическое сопротивление золы вырастает до $10^{10} \dots 10^{12}$ Ом·м.

Способы повышения эффективности работы газоочистных систем путем изменения конструкции и параметров электрофильтров (ЭФ), требующие значительных капитальных затрат, целесообразно использовать при конструировании новых объектов. Одним из способов повышения эффективности работы существующих ЭФ, который не требует его капитальной реконструкции, является применение импульсных источников питания, формирующих специальные формы напряжения и включающие системы автоматического регулирования их электрических параметров.

Несмотря на значительное количество исследований в этой области, проблема экологически чистого производства, проблема переработки и утилизации промышленных выбросов остается актуальной, особенно это касается систем с изменяющимся составом газовых выбросов.

В химическом составе выбросов есть разные классы веществ. Их утилизация не может быть эффективной при одинаковых параметрах воздействующих импульсов.

Проведенные в ИИПТ исследования по данной тематике [1] позволили разработать унифицированные блоки с необходимыми для пылегазоочистки параметрами мощности, напряжения, длительности и крутизны импульсов, обеспечивающие качество, надежность и стабильность работы систем электрофильтрации.

Основная идея данной работы – создание комплексных систем газоочистки разноимпедансной пыли с дополнительными коронирующими электродами, предусматривающими суммирование постоянного высокого напряжения действующих газоочистных систем с дополнительным разноуровневым высоковольтным импульсным напряжением, что позволит интенсифицировать процесс газоочистки и получить новые данные по электрофизическим процессам деструкции газовых выбросов.

Цель работы – повышение эффективности систем газоочистки разноимпедансных газовых выбросов путем интенсификации электрофизических процессов деструкции газовых выбросов с помощью дополнительных коронирующих электродов и разноуровневых высоковольтных высокочастотных источников питания, позволяющих варьировать частоту следования и параметры импульса.

Задача исследования – создание способа деструкции разноимпедансных газовых выбросов, обеспечивающего эффективную газоочистку всего диапазона экологически опасных газовых составляющих.

Материалы исследований. Как отмечалось выше, наличие в газовых выбросах разноимпедансных составляющих обуславливает необходимость корректировать основные параметры импульсов (длительность импульсов, частота следования импульсов) в соответствии с составом и весовыми доля-

ми максимально представленных составляющих газовых выбросов. В работе предложен способ деструкции разноимпедансных газовых выбросов экологически опасных промышленных объектов, позволяющий учитывать изменения параметров дымовых газов.

Суть предложенного способа деструкции разноимпедансных газовых выбросов экологически опасных промышленных объектов заключается в следующем. Объемный разряд образуется в разноимпедансной газовой среде при подаче на многоострийную электродную систему высоковольтных высокочастотных импульсов с коротким фронтом от импульсного источника питания с заданной длительностью и частотой следования импульсов, необходимой для деструкции каждой из значимых разноимпедансных составляющих газовых выбросов, определить которые можно предварительно согласно атласу пылей, либо используя непосредственный анализ составляющих конкретной газовой смеси. В объеме опасных разноимпедансных выбросов определяют количество и необходимый весовой коэффициент наиболее значимых составляющих газовых выбросов, и в соответствии с этим определяется необходимый алгоритм работы импульсной системы питания. Подача высоковольтных высокочастотных импульсов осуществляется от импульсных источников (либо источника), количество и длительность импульсов которых соответствует количеству и величине долей весовых составляющих газовых выбросов, необходимых для деструкции разноимпедансной газовой смеси.

Частота следования и форма импульса каждого из импульсных источников, обеспечивающих эффективную деструкцию каждой из весовых составляющих газовой смеси, определяется зависимостью:

$$f_n = k_{\text{фин}} 1/T_{\text{рн}},$$

где f_n – частота следования высоковольтных высокочастотных импульсов соответствующего источника питания, $k_{\text{фин}}$ – коэффициент формы импульса источника, $T_{\text{рн}}$ – период разрядного тока в газовой среде, обеспечивающий условия деструкции n -ной составляющей разноимпедансных газовых выбросов.

Источники питания имеют обратную связь, обеспечивающую коррекцию длины и частоты следования импульсов в соответствии с составом газовых выбросов. Предварительно состав газовых выбросов может быть определен по атласу пылей в зависимости от топлива, сжигаемого на ТЭС, либо путем непосредственного анализа структуры конкретной газовой смеси.

Представленная работа проведена на разработанном стенде [2] и является продолжением экспериментальных исследований, касающихся исследования электрофизических процессов в комплексных системах электрофилтрации, происходящих при воздействии стримерного коронного разряда дополнительного высоковольтного высокочастотного импульсного источника в разноимпедансной газовой среде. Возможности лабораторного стенда позволяли получать уровни постоянного напряжения в диапазоне от 3 до 50 кВ и импульсного на уровне до 30 кВ.

Наличие импульсного источника питания, формирующего необходимые

импульсы наносекундной длительности, позволяет повысить степень ионизации частиц пыли в ЭФ, осуществить плазмохимическое преобразование окислов углерода, серы и азота в сравнительно безопасные соединения, осуществить плазмохимическое преобразование высокомолекулярных канцерогенных соединений в простые, сравнительно безопасные соединения.

Электрофизический процесс воздействия объемного стримерного разряда, обеспечивающего деструкцию газовых выбросов в разноимпедансной газовой среде при подаче на многоострийную электродную систему высоковольтных высокочастотных импульсов с коротким фронтом от импульсного источника питания с заданной длительностью и частотой следования импульсов для одной из экологически опасных газовых составляющих (SO_2), изображен на рис. 1.

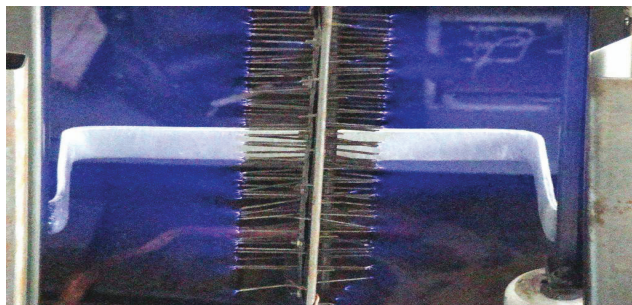


Рисунок 1 – Электрофизический процесс воздействия объемного стримерного разряда для SO_2



Рисунок 2 – Осциллограммы разрядного процесса импульсного источников питания, необходимого для деструкции двуокиси серы

Осциллограммы разрядного процесса импульсного источников питания, необходимого для деструкции двуокиси серы (частота следования импульсов 5 кГц) приведены на рис 2.

Проведенный сравнительный расчет показал, что при штатном режиме питания электрофильтра при максимальном среднем напряжении 45 кВ мощность, передаваемая в электрофильтр, в 40 раз меньше, чем при комбинированном режиме питания.

Воздействие данного объемного разряда на разноимедансные газовые выбросы позволило обеспечить деструкцию двуокиси серы с 159 мг/м^3 до 10 мг/м^3 , что соответствует европейским нормам.

Выводы. Создание комплексных систем газоочистки разноимедансных газовых выбросов с дополнительными коронирующими электродами, которые предусматривают суммирование постоянного высокого напряжения действующих газоочистных систем с дополнительным разноуровневым высоковольтным импульсным напряжением, позволяет интенсифицировать процесс газоочистки и повысить мощность, передаваемую в электрофильтр, в 40 раз.

Наличие импульсного источника питания, формирующего импульсы наносекундной длительности, позволяет повысить степень ионизации частиц пыли в ЭФ, осуществить плазмохимическое преобразование окислов вредных дополнительных газовых выбросов (NO_x , SO_x , CO_x) в сравнительно безопасные соединения, осуществить плазмохимическое преобразование высокомолекулярных канцерогенных соединений в простые, сравнительно безопасные соединения.

Предложенный способ деструкции разноимедансных газовых выбросов экологически опасных промышленных объектов, обеспечивающий эффективную деструкцию каждой из весомых составляющих экологически опасной газовой смеси, позволил существенно повысить степень газоочистки, включая экологически опасные соединения практически всего известного диапазона УЭС, до уровня европейских норм при уменьшенном на порядки энергопотреблении.

Список литературы. 1. Богуславский Л. З. Влияние режимов работы высоковольтного источника питания на формирование стримерного коронного разряда и эффективность систем газоочистки / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, Ю. Г. Казарян, Н. С. Ярошинский // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2011. – Ч. 1. – С. 44-49. **2.** Богуславский Л. З. Создание макетных образцов высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, В. В. Диордийчук, Д. В. Винниченко, Н. С. Ярошинский // Вестник «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – № 52 (958). – С. 31-39.

Bibliography (transliterated): 1. Boguslavskij, L. Z., et all. Vlijanie rezhimov raboty vysokovoltного источника питания na formirovanie strimernogo koronnogo razrjada i effektivnost sistem gazoochistki Tehn. elektrodinamika. Tem. vyp. Sylova elektronika ta energotfektyvnist. – 2011. – 44-49. **2.** Boguslavskij, L. Z., et all. Sozdanie maketnyh obrazcov vysokovoltного oborudovaniya kompleksnyh sistem elektrofiltracii ekologicheski opasnyh promyshlennyh vybrosov Vestn. Har'k. politehn. in-ta. – 2012. – № 52 (958). – 31-39.

Надійшла (received) 13.03.2014

В. В. ДЮРДІЙЧУК, мол. наук. співр., ШПТ НАН України, Миколаїв;
С. С. КОЗИРЄВ, канд. техн. наук, доцент, НУК, Миколаїв;
Л. Є. ОВЧИННИКОВА, канд. техн. наук, доцент, ст. наук. співр., ШПТ
НАН України, Миколаїв

АЛГОРИТМІЧНЕ ТА АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОЗРЯДНОІМПУЛЬСНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

Розроблено апаратно-програмний інструментарій для моделювання та тестування адаптивних систем керування розрядноімпульсними технологіями з метою забезпечення надійності підтримки необхідних технологічних режимів в умовах стохастичності та невизначеності збурюючих впливів.

Ключові слова: розрядноімпульсні технології, адаптивна система керування, апаратні та програмні засоби, моделювання, тестування.

Вступ. У сучасному виробництві набувають широкого застосування розрядноімпульсні технології, в яких використовується високовольтний розряд у рідині. В каналі високовольтного розряду відбувається електровибухове перетворення енергії електричного поля в механічну енергію розширення каналу розряду, що дозволяє здійснювати концентрований, направлений вплив в заданих локальних об'ємах та поверхнях, з досягненням високих питомих енергетичних показників. Розрядноімпульсні технології застосовуються для отримання матеріалів з нетрадиційними властивостями та забезпечення високоефективних методів обробки матеріалів і виробів. Подальше розширення області застосування розрядноімпульсних технологій та підвищення їх продуктивності потребує синтезу адаптивних систем керування, що забезпечать необхідні режими обробки при змінних технологічних параметрах і невизначеності зовнішніх впливів.

Аналіз попередніх досліджень. Розрядноімпульсні технології як об'єкт керування відносяться до багатовимірних дискретно-неперервних нормальних стохастичних систем з вихідними координатами у вигляді випадкових функцій нестационарних по математичному сподіванню [1]. Це обумовлено властивостями електровибухового перетворення енергії, що застосовується як інструмент у даних технологіях.

Забезпечення керованості об'єктів такого класу у всьому просторі станів потребує введення механізмів адаптації для врахування нестационарності та стохастичності об'єкта. Механізм адаптації можна забезпечити, використовуючи системи керування на основі нечітких моделей [2]. Для реалізації син-

тезованих адаптивних законів керування розрядноімпульсними технологіями на основі нечітких моделей, які забезпечують керованість на всьому просторі станів з урахуванням нелінійності, стохастичності та невизначеності збурюючих впливів, необхідне застосування мікропроцесорної обчислювальної системи з достатньою швидкістю, точністю і об'ємом оперативної та зовнішньої пам'яті.

При проектуванні та тестуванні потужних мікропроцесорних обчислювальних систем доцільно мати апаратно-програмний інструментарій для моделювання реальних режимів роботи системи керування, що дасть змогу прискорити розробку, знизити затрати на проектування та забезпечити надійність при експлуатації.

Мета роботи – розробка алгоритмічного та апаратно-програмного інструментарію для моделювання режимів роботи адаптивних систем керування на основі нечітких моделей, побудованих з використанням методів fuzzy-апроксимації.

Матеріали досліджень. В основу побудови апаратно-програмного комплексу моделювання режимів роботи адаптивної мікропроцесорної системи керування розрядноімпульсними технологіями покладено принцип модульності та уніфікації інтерфейсів. Цим вимогам відповідає багаторівнева ієрархічна структура. Мінімальна конфігурація системи – трьохрівнева. Вона включає локальний рівень, рівень функціональних підсистем та рівень диспетчерського керування.

При розробці архітектури проведено аналіз вимог до засобів і способів доступу до елементів системи, організації і розрядності інтерфейсів, організації і способів адресації пам'яті, обробки переривань.

Комплекс складається з підсистем різного призначення, в яких аналогові сигнали з датчиків нормуються, перетворюються у цифровий код, оброблюються відповідно до заданих моделей і алгоритмів та перетворюються до виду інформаційних координат. Ці функції виконують складні мікропроцесорні системи, у вигляді окремих модулів з уніфікованими інтерфейсами, що дозволяє використовувати шини даних (ШД/СШД) і шини адрес (ША/США) як загальний ресурс цифрової системи.

В якості основних керуючих компонентів підсистем усіх рівнів використані контролери фірми Atmel серії Mega (AtMega16, AtMega8535), оскільки вони забезпечують необхідну швидкість керування елементами системи та мають повний набір необхідних функцій.

При налагодженні, тестуванні та випробуванні окремих блоків цифрової системи керування комплекс забезпечує можливість їх роботи як в автономному режимі, оскільки всі блоки мають додаткові підсистеми індикації і панелі введення інформації, так і у складі системи, завдяки уніфікованому інтерфейсу SPI, який апаратно реалізовано у мікроконтролерах фірми Atmel. Структура шини SPI дозволяє гнучко змінювати конфігурацію системи при

проведенні експериментальних досліджень, наприклад, для визначення параметрів технологічних режимів.

З метою реалізації алгоритмів обробки даних, алгоритмів керування об'єктом та забезпечення сукупності специфічних протоколів взаємодії підсистем та системи в цілому з хост-комп'ютером диспетчерського рівня або іншими мікропроцесорними системами розроблено комплекс програмних засобів.

Структура комплексу програмного забезпечення (ПЗ) повторює ієрархічну структуру системи керування в цілому. За принципом приналежності до рівня системи керування комплекс ПЗ розділено на програмне забезпечення АРМ оператора, програмне забезпечення центральної функціональної процесорної системи та програмне забезпечення підпорядкованих локальних систем. Додатково, за функціональними ознаками, програмне забезпечення кожного рівня системи поділено на рівень команд, рівень транзакцій протоколу, рівень сигналів.

Рівень програмного забезпечення команд представлено набором чітко визначених операцій, специфічних для кожного рівня ієрархії системи. Він дозволяє реалізувати функціональну наповненість підсистем та системи вищого рівня без доступу до низькорівневих програмних функцій, що значно спрощує алгоритми роботи як одної окремої підсистеми так і всієї системи в цілому. На базі рівня команд будується інтерфейс користувача і системи керування, систем вищого рівня та виконавчих локальних підсистем. Командна взаємодія між елементами системи відбувається завдяки рівню транзакції, через який відбувається обмін командами та даними в системі.

Рівень транзакцій присутній у кожному елементі всієї ієрархії системи, оскільки завдяки йому відбувається взаємозв'язок всіх пристроїв системи в єдиному цілому. Цей рівень відокремлюється від загального комплексу ПЗ завдяки наявності в системі низки специфічних протоколів передачі команд та даних, а отже і їх алгоритмів проміжної обробки та формування пакетів даних за правилами встановленими протоколом. Потік запитів від підсистем направлений за ієрархією зверху вниз, але основний потік даних про процес керування та стан системи - від локальних до центральних. Таким чином робота протоколів системи будується на базі запитів та команд, що надходять від верхніх рівнів, та масивів даних від нижніх рівнів, що надсилаються у відповідь на запити. Рівень транзакції має безпосередній доступ до системного ПЗ, що керує уніфікованими інтерфейсами системи, на базі яких відбувається обмін даними.

Системне ПЗ має доступ безпосередньо до апаратних ресурсів мікроконтролерів та мікропроцесорів підсистем та фактично є набором драйверів пристроїв підсистем всіх рівнів, тобто являє собою комплекс програмного забезпечення низького рівня. Основна задача, що покладена на системне ПЗ, формування послідовності сигналів керування згідно з командами, що надходять від ПЗ вищих рівнів та згідно з даними, отриманими за допомогою протоколів передачі. Сигнали керування сформовані системним ПЗ передаються безпосередньо на порти

вводу-виводу або на сигнальні лінії інтерфейсів системи.

ПЗ центральної мікропроцесорної системи (ЦМПС) забезпечує реалізацію алгоритму керування на базі даних, отриманих від підсистем виміру електродинамічних параметрів розряду, та керуючих даних, отриманих від оператора при керуванні в ручному режимі. При моделюванні автоматичного режиму роботи системи керування відбувається збір інформації про технологічний процес від підсистем локального рівня та її обробка відповідно до закладеної моделі об'єкта керування та алгоритму керування. Структура ПЗ ЦМПС додатково має підтримку елементів керування та виводу інформації для реалізації можливості роботи системи в автономному режимі. Оскільки центральна функціональна процесорна система є ланкою, що поєднує систему керування верхнього рівня (АРМ оператора) та підсистеми локального рівня, то її алгоритм включає велику кількість умовних операторів.

ПЗ ЦМПС реалізовано на базі мікроконтролера загального призначення з ядром ARM7 AT91SAM7X256, що має в своєму складі уніфіковані інтерфейси, які відповідають інтерфейсам диспетчерського рівня. ПЗ ЦМПС розроблено на алгоритмічній мові C, спеціалізованій для цього типу контролерів за допомогою компілятора WinARM (вільно розповсюджуваний). Були розроблені бібліотеки низькорівневого доступу до пристроїв мікроконтролера та бібліотеки протоколів обміну інформацією.

ПЗ диспетчерського рівня реалізовано на апаратній платформі Intel-сумісних ПК та програмній платформі Windows-XP. Розроблено алгоритми моніторингу і диспетчерського керування режимами роботи мікропроцесорних систем керування. Програмне забезпечення розроблено на мові високого рівня Delphi7 з використанням API-функцій Windows, багатопотоковості і DLL-бібліотек. Перелік функцій підсистеми диспетчерського рівня включає: зміну/введення початкових даних; вибір режимів роботи; завантаження даних до системи регулювання режиму розряду та запуск системи в роботу; моніторинг параметрів керування.

Створений апаратно-програмний інструментарій використовується для моделювання реальних режимів роботи та тестування мікропроцесорних систем керування розрядноімпульсними технологіями. Результати моделювання роботи мікропроцесорних систем керування режимами розрядноімпульсних технологічних процесів на основі використання розроблених алгоритмів і математичних моделей відображається в головному вікні АРМ оператора апаратно-програмний комплекс.

Розроблено бібліотеку алгоритмів роботи ПЗ мікропроцесорних систем керування різними розрядноімпульсними технологіями, такими як очищення виливків, обробка металів тиском, руйнування та подрібнення негабаритів, інтенсифікація кристалізації металів та ін.

Приклад алгоритму роботи ПЗ центральної мікропроцесорної системи керування розрядноімпульсною технологією очищення виливків наведено на рис. 1.

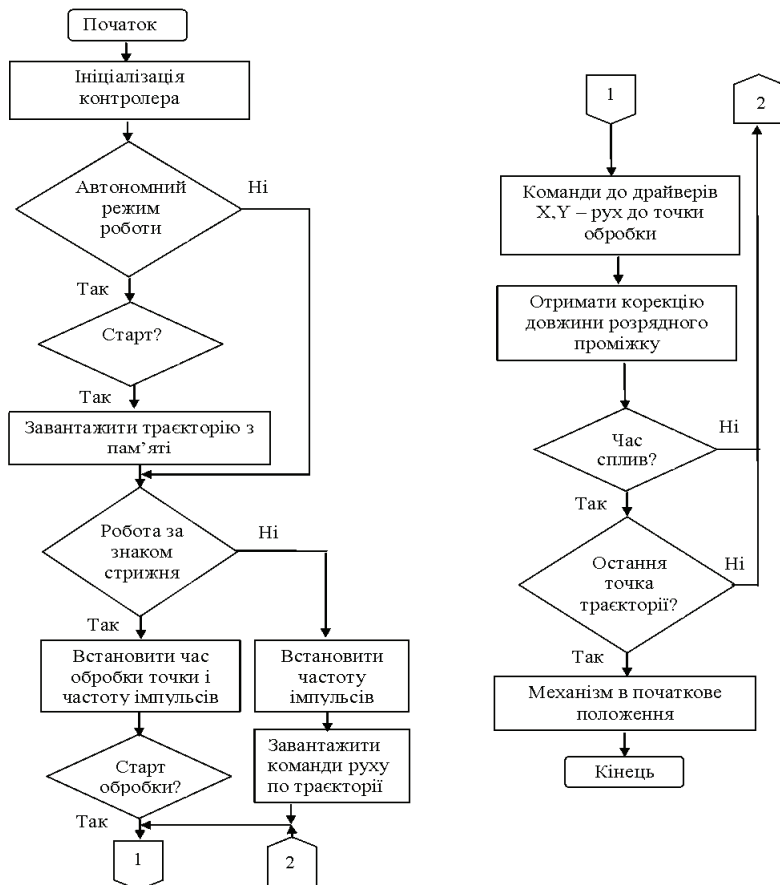


Рисунок 1 – Алгоритм роботи ПЗ центральної мікропроцесорної системи керування розрядноімпульсною технології очищення виливків

Результати моделювання роботи мікропроцесорної системи керування режимом розрядноімпульсного очищення виливків на основі наведеного алгоритму, що відображається в головному вікні АРМ оператора апаратно-програмний комплекс, наведено на рис. 2.

Результати моделювання підтверджують адекватність роботи системи, так при зміні інформаційної координати (верхня залежність на рис. 2) система реагує зміною та стабілізацією вихідної координати (нижня залежність, ломана крива) на рівні величини оптимального розрядного проміжку (нижня залежність, пряма лінія) з точністю, що не перевищує зону нечутливості трипозиційного регулятора.

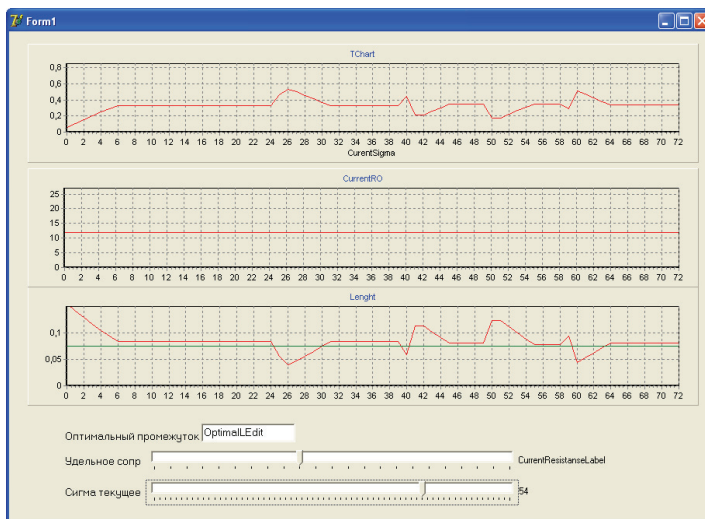


Рисунок 2 – Результати моделювання роботи мікропроцесорної системи керування

Висновки. На основі побудованих математичних моделей, розроблених програмних засобів та проектних рішень створено алгоритмічне та апаратно-програмне забезпечення моделювання режимів роботи мікропроцесорних систем керування розрядноімпульсними технологіями. Проведені дослідження мікропроцесорних систем керування підтвердили адекватність створених моделей та програмних алгоритмів. Використання комплексу при проектуванні та тестуванні систем керування забезпечить надійність роботи при експлуатації.

Список літератури: 1. Вовк И. Т. Управление электрогидроимпульсными процессами / И. Т. Вовк, В. Б. Друмирецкий, Е. В. Кривицкий, Л. Е. Овчинникова. – К.: Наукова думка, 1984. – 186 с. 2. Козырев С. С. Адаптивная система управления электроимпульсной установкой с использованием нечеткого регулятора / С. С. Козырев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – № 37. – С. 92-100.

Bibliography (transliterated): 1. Vovk I. T. Upravlenie elektrogidroimpul'snyimi protsessami I. T. Vovk, V. B. Drumiretskiy, E. V. Krivitskiy, L. E. Ovchinnikova. – K.: Naukova dumka, 1984. – 186. 2. Kozyrev S. S. Adaptivnaya sistema upravleniya elektroimpul'snoy ustanovkoy s ispol'zovaniem nechetkogo regul'yatora S. S. Kozyrev Vestnik NTU «HPI». – 2006. – № 37. – 92-100.

Надійшла (received) 18.03.2014

В.Г.ЖЕКУЛ, канд. техн. наук, старш. научн. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев;

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

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

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

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

ИССЛЕДОВАНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ РАЗРЯДНИКОВ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ПОГРУЖНЫХ УСТАНОВОК

Исследованы высоковольтные газонаполненные неуправляемые разрядники электроразрядных погружных установок. В результате анализа конструктивных особенностей разрядника выявлены причины, приводящие к нестабильности его характеристик: величины пробивного напряжения (напряжения срабатывания). Предложена методика настройки разрядника, обеспечивающая условие малого диапазона разброса напряжения срабатывания.

Ключевые слова: высоковольтный разрядник, электрический разряд, электроразрядная погружная установка

Введение. Электроразрядные погружные установки (ЭПУ) находят широкое применение для восстановления притока флюидов в водозаборных и нефтяных скважинах, а также приемистости нагнетательных скважин [1,2]. Практически все высоковольтные блоки погружной части ЭПУ, такие, как зарядный блок, накопители (высоковольтные импульсные конденсаторы), высоковольтный разрядник имеют существенные конструктивные отличия от общепринятого исполнения. Эти отличия обусловлены как ограничениями по габаритным размерам, так и рабочими условиями, заключающимися в гидростатических давлениях до 50 МПа и температуре до 100 °С [3,4].

Погружная часть ЭПУ имеет уже установившиеся массогабаритные показатели (длина – порядка 5 метров, диаметр – 102 мм, вес – около 140 кг), которые удовлетворительно согласуются с возможностями обслуживания ЭПУ на скважине. При этом запасенная энергия ЭПУ составляет порядка 1 кДж, частота следования разрядов – от 0,2 до 0,25 Гц.

Учитывая жесткие массогабаритные ограничения, накладываемые на электротехническое оборудование погружной установки, повышение потока энергии и реализуемой мощности на объекте обработки (призобойной зоне

скважины) возможно достичь лишь путями повышения эффективности энергоснабжения в единичном разряде и увеличения частоты следования этих разрядов. Это обуславливает интерес к исследованиям повышения эффективности работы всех блоков погружной части ЭПУ, а именно: зарядного блока, накопительных конденсаторов, разрядника и электродной системы, в том числе и в условиях повышенной частоты следования разрядов.

В данном сообщении речь пойдет об исследованиях повышения эффективности работы газонаполненного неуправляемого разрядника ЭПУ.

Анализ проблемы и цель исследований. На рынке электротехнического высоковольтного оборудования существуют предложения по неуправляемым коммутирующим разрядникам [5], представляющим интерес для использования их в погружных установках. В частности, разрядники серии РК86 обладают соответствующими ЭПУ рабочими параметрами: напряжением срабатывания (до 30 кВ), уровнем коммутируемой энергии (до 3000 Дж), частотой следования разрядов (до 300 Гц) и другими. Однако нестабильность срабатывания разрядников может составлять порядка 15 % от среднестатистического пробивного напряжения. Для условий работы ЭПУ это слишком большая величина.

Рассмотрим, как характеристика стабильности срабатывания разрядника влияет на эффективность и стабильность работы ЭПУ в целом.

Действительно, максимальное значение напряжения срабатывания разрядника не должно превышать номинальное напряжение накопительных конденсаторов (в нашем случае – это 30 кВ), чтобы не снижать их ресурс, то есть существует верхнее ограничение напряжения срабатывания разрядника.

При этом эффективная работа электродной системы ЭПУ ожидается при напряжении порядка 30 кВ и более, что обусловлено повышенным гидростатическим давлением в скважине и затруднениями с формированием пробоя в межэлектродном промежутке, то есть существует нижнее ограничение напряжения срабатывания разрядника.

Как видно, есть единственная возможность удовлетворить эти противоположные требования – это уменьшить, в идеальном случае, до нуля статистический разброс срабатывания разрядника, приблизив среднестатистическое напряжение срабатывания разрядника к номинальному напряжению конденсатора:

$$U_{ном} = U_{сраб} + (+\Delta U), \quad (1)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение конденсатора, В; $U_{сраб}$ – среднестатистическое значение напряжения срабатывания разрядника, В; $(+\Delta U)$ – положительная абсолютная величина отклонения напряжения срабатывания разрядника от среднестатистического значения при доверительной вероятности события, равной 0,99, В.

Очевидно, что нулевое значение отклонения $(+\Delta U)$ обеспечить невозможно, но выявить причины его возникновения, разработать методические

предложения для значительного уменьшения его при настройке разрядника на рабочие режимы и изучения его поведения в зависимости от изменения условий эксплуатации ЭПУ является целью настоящей работы.

Основная часть. 1. Анализ конструктивных особенностей реального разрядника. Разработчик сам изготавливает высоковольтный неуправляемый газонаполненный разрядник [4] для ЭПУ, который состоит из стального цилиндрического корпуса 1 (рис. 1) с размещенными в нем двумя электродами 2 и 3. В области межэлектродного промежутка для исключения пробоя на корпус на его внутренней поверхности расположена круговая изоляция 4. Разрядник заполняется техническим азотом через клапан 5. Ввиду высокой температуры рабочей среды и разогрева разрядника в процессе работы [6] в качестве высоковольтных изоляторов 6 и 7 используются керамические изоляторы типа ИКПМ–63 [7]. Также применение керамики позволяет избежать газобразования при ультрафиолетовом облучении изоляции искровым каналом.

Особенности электростатического поля данной конструкции, оптимальные соотношения размеров элементов и ожидаемая стабильность работы разрядника ранее обсуждались при теоретическом рассмотрении в работе [8]. Однако в реальных конструкциях разрядника наблюдаются нерегулярности в поведении напряжения срабатывания (пробивного напряжения) при его настройке и существенный статистический разброс этой характеристики.

Рассмотрение особенностей изготовления разрядника позволило выявить некоторые предпосылки к несоответствию идеальному исполнению. Первая из них – это наличие допусков на отклонение от прямолинейности оси цилиндрических электротехнических изделий из керамики, которые составляют до $1,5 \text{ мм} + 0,8 \%$ от номинальной высоты изолятора [9]. Вторая – наличие допусков на крепление арматуры на изоляторе [10]. Также источником отклонений является способ соединения юбок изоляторов 6, 7 с фланцами 8 и 9 (рис. 1) с помощью сварки, качество и допуски на изготовление токарных изделий и сборки сочленяемых компонентов конструкции разрядника. В итоге оси электродов 2 и 3, как правило, смещены относительно друг друга и их рабочие поверхности в общем случае не являются параллельными.

Также следует учитывать тот факт, что регулировка длины межэлектродного расстояния при настройке напряжения срабатывания разрядника в данной конструкции обеспечивается вращением двух либо одного из фланцев 8 и 9 относительно корпуса 1 по резьбовому соединению с шагом 1,5 мм. В этом случае рабочие плоскости электродов 2 и 3 образуют межэлектродный промежуток с изменяющейся геометрией.

2. Разработка методики исследований. На основании проведенного анализа предложены следующие методические подходы к программе настройки и испытаний каждого отдельного разрядника:

– для уменьшения вариантов взаимного расположения электродов 2 и 3

регулировать межэлектродный промежуток вращением лишь одного из фланцев при другом неподвижном;

– производить исследование изменения величины напряжения срабатывания разрядника и стабильности этой характеристики в зависимости от угла поворота одного из электродов относительно другого электрода, начиная от некоторого произвольного начального положения;

– для дальнейших испытаний выбирать в качестве начальных режимов такие, которые характеризуются наибольшей стабильностью.

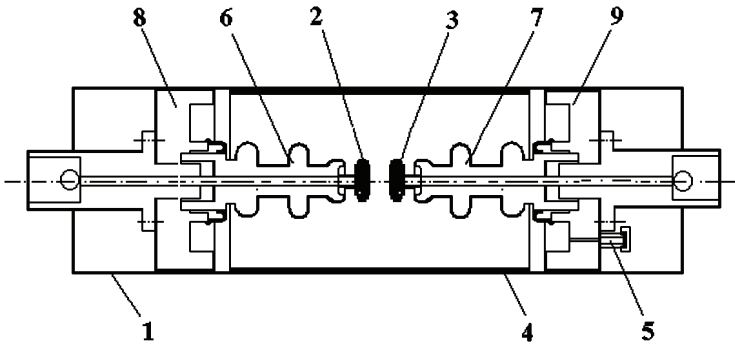


Рисунок 1 – Высоковольтный неуправляемый газонаполненный разрядник электроразрядной погружной установки: 1 – стальной цилиндрический корпус; 2, 3 – электроды; 4 – круговая изоляция; 5 – клапан; 6, 7 – керамические изоляторы; 8, 9 – фланцы

Для проведения исследований изготовлен исследовательский стенд, блок-схема которого представлена на рис. 2. Для испытаний разрядника были выбраны параметры электрической схемы и технологический режим: диапазон варьирования напряжения высоковольтного источника – от 24000 до 31000 В; емкость высоковольтного конденсатора $C = 2 \times 10^{-6}$ Ф; частота следования разрядных импульсов – 0,2 Гц; нагрузка – искровой канал в межэлектродном промежутке оптимальной длины электродной системы ЭПУ. Для визуальной оценки уровня рабочего напряжения и настройки активного делителя напряжения использовался киловольтметр типа С-196, а в динамическом режиме измерения проводились с помощью активного делителя напряжения (коэффициент деления – 3783 ± 65) и цифрового осциллографа типа TDS-2024В.

3. Исследования напряжения и стабильности срабатывания разрядника от угла поворота электрода. Характерная осциллограмма напряжений срабатывания разрядника, повторяющихся с частотой 0,2 Гц, приведена на рис. 3. Данные о значениях напряжения срабатывания разрядника (до 50 точек из одной серии) подвергались статистической обработке с вычислением среднестатистического значения величины и среднеквадратического откло-

нения (данные по отклонениям $-\Delta U$, $+\Delta U$ на рис. 4 и в таблице даны для доверительной вероятности события, равной 0,99) [11].

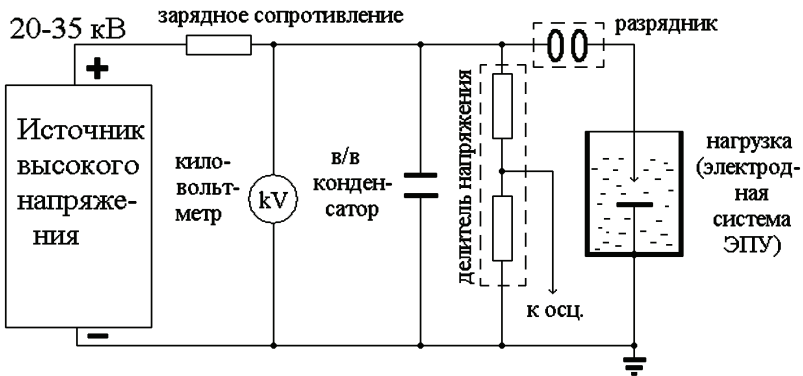


Рисунок 2 – Блок-схема исследовательского стенда

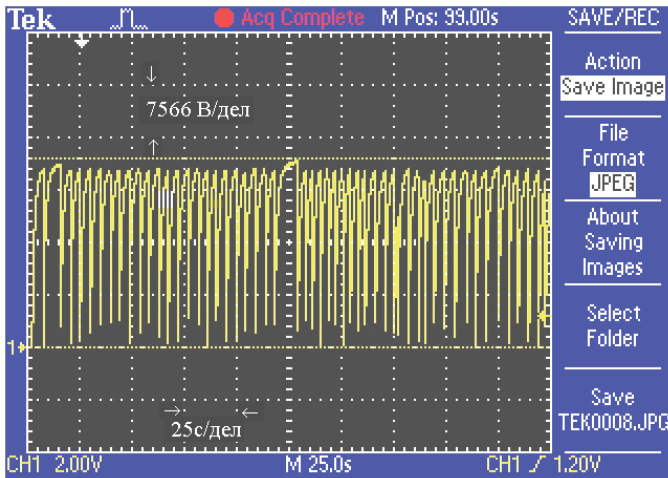


Рисунок 3 – Характерная осциллограмма напряжений срабатывания разрядника

В соответствии с намеченной программой были проведены исследования напряжения и стабильности срабатывания разрядника при повороте одного электрода относительно другого (круговая диаграмма) с шагом поворота $\varphi = 60^\circ$ против часовой стрелки. При этом также происходит увеличение межэлектродного расстояния h .

Как следует из рис. 4, существуют позиции взаимного расположения электродов, при которых статистический разброс напряжения срабатывания $U_{ср\text{аб}}$ минимальный, например, в промежутке от 360 до 480 градусов, что со-

ответствует межэлектродным расстояниям от 12,5 до 13 мм. Также прослеживается характерная особенность данной конструкции разрядника, которая заключается в том, что дальнейшее увеличение межэлектродного расстояния с целью увеличения напряжения срабатывания приводит к существенному статистическому разбросу, что ограничивает возможности регулирования напряжения срабатывания. Значения напряжения срабатывания, характеризующиеся наименьшим статистическим разбросом (порядка 0,92 % при $h = 12,7$ мм), можно выбирать в качестве начальных при дальнейшей настройке и испытаниях разрядника.

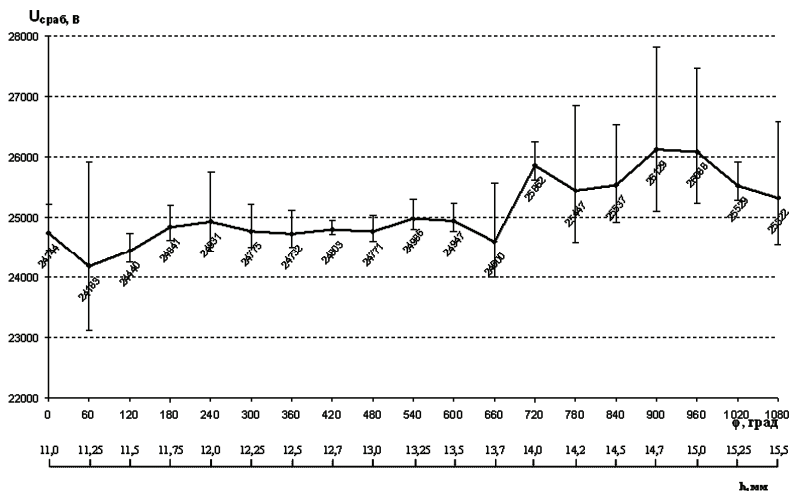


Рисунок 4 – Зависимость напряжения срабатывания разрядника от угла поворота электрода и длины межэлектродного промежутка (круговая диаграмма)

4. Исследования стабильности работы разрядника в условиях, приближенных к эксплуатационным. Как уже указывалось, для определения перегрева разрядника необходимо учитывать два слагаемых - повышение температуры прогрева разрядника из-за геотермального градиента в скважине и его собственного энерговыделения. Если первое слагаемое следует из характеристики скважины, то для определения второго данных [6] недостаточно, поскольку они приведены для случая расположения разрядника в воздухе. Наши предварительные оценки перегрева, достигаемого при работе разрядника, погруженного в жидкую среду, дают значения дополнительного перегрева в устоявшемся режиме работы порядка 5 °С.

Для выбранного начального положения электродов были проведены исследования влияния температуры корпуса разрядника, погруженного в жидкую среду, времени непрерывной работы при частоте следования разрядов 0,2 Гц на относительный разброс напряжения срабатывания разрядника в %, определяемого как $(|-ΔU|+|+ΔU|) \times 100 / U_{сраб}$. Данные приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Относительный разброс напряжения срабатывания разрядника в % при доверительной вероятности 0,99 при частоте разряда 0,2 Гц

Температура корп. разр., °С	Время непрерывной работы, мин.				
	0	10	20	30	40
22	1,07	1,65	1,27	2,09	1,56
50	1,11	0,85	0,88	0,85	0
85	0	0,58	0,9	0,86	0,51

Как следует из табличных данных, максимальное значение разброса напряжения срабатывания разрядника составляет не более 2,09 %, что является хорошим результатом.

Обсуждение результатов. Обсуждаемый круг вопросов и полученные результаты имеют конечной целью повышение стабильности и надежности работы ЭПУ в сочетании с максимальной его эффективностью.

В данном случае под стабильностью будем понимать максимально возможную повторяемость во времени энергетических параметров установки и обеспечиваемого ими технологического эффекта.

Под надежностью работы понимаем обеспечение заявленных параметров и безаварийность в течение гарантийного срока.

Под максимальной эффективностью понимаем прежде всего максимально достижимые уровни запасаемой энергии $W_{зан}$, которая определяется как

$$W_{зан} = C U_{сраб}^2 / 2, \quad (2)$$

где C – емкость конденсаторной батареи, Ф; $W_{зан}$ – запасаемая энергия, Дж.

И с учетом выражения (1)

$$W_{зан} = C (U_{ном} - |\Delta U|)^2 / 2. \quad (3)$$

Подвергая анализу выражение (3), следует пояснить, что номинальное напряжение высоковольтного конденсатора $U_{ном}$ в данном случае является важной величиной, определяющей энергетические и технологические возможности ЭПУ, в отличие от наземных электротехнических установок. Это определяется жесткими массогабаритными ограничениями и предельными температурными нагрузками, учитываемыми разработчиками при создании данного типа конденсаторов. В связи с этим они работают на пределе заявленных параметров, в том числе и заявленного ресурса - $1,2 \times 10^5$ импульсов.

В связи с этим принципиальным вопросом для разработки методики настройки разрядника на рабочие режимы является определение допустимого напряжения срабатывания разрядника $U_{сраб}$. Порог этой величины определяется номинальным напряжением $U_{ном}$ высоковольтных импульсных конденсаторов, при котором обеспечивается заявленный ресурс [12].

Например, для конденсаторов ИКП-30-1,2 [3,4] с номинальным напряжением 30000 В напряжение $U_{сраб}$ должно составлять 30000 – (+ΔU) и в соответствии с полученными значениями +ΔU (см. табл.) может находиться в пределах от 29500 до 29700 В.

Таким образом, наряду с обеспечением стабильных режимов работы электродных систем ЭПУ [13] решение задачи повышения стабильности работы разрядников создает предпосылки для реализации эффективной и надежной электроразрядной технологии повышения продуктивности скважин.

Выводы. В результате анализа конструктивных особенностей газонаполненного неуправляемого разрядника выявлены причины, приводящие к неидеальности его исполнения и, как следствие, к нерегулярности в поведении характеристики напряжения срабатывания и существенной нестабильности этой характеристики.

Предложены методические подходы к настройке разрядника, обеспечивающие поиск малых диапазонов разброса напряжения срабатывания, разработан исследовательский стенд и проверено, что относительный разброс напряжения срабатывания разрядника может составлять до 2,09 % при изменениях температуры корпуса разрядника, погруженного в жидкую среду, от 22 до 85 °С, времени непрерывной работы до 40 минут при частоте следования разрядов 0,2 Гц.

Список литературы: 1. *Максутов Р. А.* Использование электроразрядного воздействия на призабойную зону / *Р. А. Максутов, О. Н. Сизоненко, П. П. Малюшевский* // Нефтяное хозяйство. – 1985. – № 1. – С. 34-35. 2. *Жекул В. Г.* Электроразрядная обработка скважин на нефтедобывающих месторождениях Украины / *В. Г. Жекул, В. А. Кучернюк, Ю. И. Мельхер и др.* // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: Сб. науч. тр. Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2012. – Вып. 21. – С. 72-77. 3. *Дубовенко К. В.* Разрядно-импульсное оборудование, разработанное в ИИПТ НАН Украины для увеличения дебита нефтяных и водозаборных скважин / *К. В. Дубовенко, Ю. И. Курашко, И. С. Швец* // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: Сб. науч. тр. Тем. вып. «Электроэнергетика и преобразовательная техника». – 2002. – Вып. 7. – С. 96-103. 4. *Швец И. С.* Электроразрядный комплекс для интенсификации добычи шахтного метана / *И. С. Швец, Ю. И. Курашко, О. В. Хвоцан и др.* // Наука та інновації. – 2008. – Т. 4, № 6. – С. 54-59. 5. Сайт компании ООО «Импульсные технологии». Режим доступа: <http://www.pulsetech.ru>. 6. *Хвоцан О. В.* Исследование теплового поля разрядника погружных скважинных комплексов / *О. В. Хвоцан, Ю. И. Курашко, Ю. И. Мельхер и др.* // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: Сб. науч. тр. Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2009. – № 39. – С. 198-205. 7. Изоляторы керамические проходные на напряжение свыше 1000 В. ГОСТ 22229-83. Дата введения 01.01.85. Группа Е35. 8. *Дубовенко К. В.* Моделювання імовірності пробою газової ізоляції високовольтних пристроїв систем електроенергетики / *К. В. Дубовенко* // Технічна електродинаміка. – 2006. – № 2. – С. 15-22. 9. Изделия керамические электротехнические. Предельные отклонения от номинальных размеров, формы и расположения поверхностей. ГОСТ 13872-68. Дата введения 01.07.69. Группа Е35. 10. Токоведущие выводы изоляторов. ГОСТ 10434-82. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие требования. 11. *Зайдель А. Н.* Погрешности измерений физических величин / *А. Н. Зайдель*. – Л.: Наука, 1985. – 112 с. 12. Конденсаторы постоянной емкости. Термины и определения. ГОСТ 21415-75. – М.: 1976. – 19 с. 13. *Жекул В. Г.* Электроразрядные погружные установки со стабилизированными рабочими параметрами / *В. Г. Жекул, С. Г. Поклонов, И. С. Швец* // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 2. – С. 89-91.

Bibliography (transliterated): 1. Maksutov R. A., O. N. Sizonenko and P. P. Maljushevskij. «Is-pol'zovanie jelektrozrazjadnogo vozdejstvija na prizabojnuju zonu.» Neftjanoe hozjajstvo. No1. 1985. 34-35. 2. Zhekul V. G., et al. «Jelektrozrazjadnaja obrabotka skvazhin na nefteobvyvajushhijh mestorozhdenijah Ukrainy.» Vestnik NTU «KhPI». No 21. 2012. 72-77. 3. Dubovenko K. V.,

Ju. I. Kurashko and I. S. Shvec «Razrjadno-impul'snoe oborudovanie, razrabotannoe v IIPТ NAN Ukrainy dlja uvelichenija debita nefťjanyh i vodozabornyh skvazhin.» Vestnik NTU «KhPI». No. 7. 2002. 96-103. 4. Shvec I. S., et al. «Jelektorazrjadnyj kompleks dlja intensivifikacii dobychi shahtnogo metana.» Nauka ta innovacii 4.6 (2008): 54-59. 5. ООО «Impul'snye tehnologii». <http://www.pulsetech.ru>. 6. Hvosshhan O. V., et al. «Issledovanie teplovogo polja razrjadnika pogruznyh skvazhinnyh kompleksov.» Vestnik NTU «KhPI». No. 39. 2009. 198-205. 7. Izoljatory keramicheskie prohodnye na naprjazhenie svyshe 1000 V. GOST 22229-83. 01.01.85. E35. 8. Dubovenko K.V. «Modeljuvannja imovirnosti probuju izoljacii visokovol'tnih pristoiv sistem elektroenergetiki.» Tehnichna elektrodinamika. No 2. 2006. 15-22. 9. Izdelija keramicheskie jelektrotehnicheskie. Predel'nye otklonenija ot nominal'nyh razmerov, formy i raspolozhenija poverhnostej. GOST 13872-68. 01.07.69. E35. 10. Tokovedushhie vyvody izoljatorov. GOST 10434-82. Soedinenija kontaktne jelekticheskie. Klassifikacija. Obshhie trebovanija. 11. Zajdel' A.N. Pogreshnosti izmerenij fizicheskikh velichin. Leningrad: Nauka, 1985. 12. Kondensatory postojannoj emkosti. Terminy i opredelenija. GOST 21415-75. 13. Zhekul V.G., S. G. Poklonov and I. S. Shvec «Jelektorazrjadnye pogruznyje ustanovki so stabilizirovannymi rabochimi parametrami.» Nefťjanoje hozjazjstvo. No 2. 2006. 89-91.

Надійшла (received) 18.03.2014

УДК 621.315

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

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

В.В. ЗОЛОТАРЕВ, канд. техн. наук, директор по внешнеэкон. связям, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков;

Р.В. БЕЛЯНИН, начальник цеха, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков;

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

ВЫБОР ОСНОВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ИСПЫТАНИЯМ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ОБРАЗЦОВ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Исходя из условия обеспечения необходимого ресурса работы 30 лет для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6...330 кВ проведен выбор параметров их основных электрических испытаний. Приведены требования европейских стандартов (IEC/CENELEC), стандартов России, а также стандартов США по урону испытательного напряжения, времени его приложения к испытуемому образцам кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. На основании международных стандартов установлены нормы испытаний высоковольтных кабелей, выпускаемых ПАО «Завод Южкабель», Украина.

Ключевые слова: силовой кабель, сшитый полиэтилен, электрические испытания.

© В.М. Золотарев, Ю.А. Антонец, В.В. Золотарев, Р.В.Белянин, А.А. Науменко, 2014

Введение. В последнее время все более широкое распространение получают силовые кабели на напряжение 6... 500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена [1]. Характерным для них является наличие трехслойной сшитой конструкции типа «полупроводящий экран по жиле – собственно изоляция из высококачественного сшитого полиэтилена – полупроводящий экран по изоляции». Эта конструкция накладывается на жилу одновременно тремя экструдерами, работающими на строенную головку. Далее происходит одновременная сшивка всех трех слоев в наклонной вулканизационной линии при температуре до 450 °С в среде сухого азота при давлении до 15 атм. Этот процесс пероксидной сшивки позволяет принципиально обеспечить необходимое качество граничных поверхностей «жила – полупроводящий экран по жиле», полупроводящий экран по жиле – полиэтиленовая изоляция», «полиэтиленовая изоляция – полупроводящий экран по изоляции», а также качество наружной поверхности полупроводящего экрана по жиле. Именно свойства этих граничных поверхностей влияют на уровень ЧР, условия развития трингов и, в конечном счете, на ресурс кабеля, который должен составлять не менее 30 лет [2].

Постановка проблемы. В процессе разработки отечественных образцов кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6... 330 кВ возникла проблема выбора основных условий электрических испытаний с учетом обеспечения требуемого ресурса работы.

Решение проблемы проводилось с учетом поставки кабелей на экспорт в страны ближнего и дальнего зарубежья. Для выбора условий испытаний был проведен анализ нормативной базы Российской Федерации (ТУ 16.К71 – 335 – 2004), европейских стандартов (МЭК/IEC – 60502, CENELEC/HD 62051:1996) и стандартов США (ANSI/ICEA) применительно к поточным (приемо-сдаточным) испытаниям.

Важнейшим видом поточных неразрушающих испытаний являются испытания готового изделия повышенным переменным напряжением во время приемо-сдаточных заводских испытаний на каждой строительной длине. При этом изоляция кабеля испытывается напряжением установленной кратности (по отношению к напряжению U_0 между жилой и экраном кабеля) в течение времени, также установленного нормативно-технической документацией на данное изделие. Такие требования по величине испытательного напряжения для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена приведены в табл. 1. [1,3].

Как показывает таблица, требования ведущих стран-производителей кабельной продукции, помимо испытаний напряжением предусматривают также и регистрацию уровня частичных разрядов (ЧР), причем требования достаточно жесткие и не превышают уровня 10 пКл даже для кабелей высокого (до 110 кВ) и сверхвысокого (до 500 кВ) напряжений (табл. 2).

Из приведенных выше сравнений видно, что наибольшая кратность напряжений составляет 4 для кабелей СН и 2 для кабелей ВН и СВН при испы-

тании на ЧР, уровень которых не должен превышать 5 пКл. Кратность при контроле строительных длин электрическим напряжением для кабелей СН может доходить до 4,3, а для кабелей ВН и СВН – до 3 при времени испытаний соответственно 5...15 и 15...60 мин.

Таблица 1 – Действующие требования к поточным электрическим испытаниям кабелей среднего напряжения (6-35 кВ)

Вид испытаний	Россия	Европа		США
	ТУ 16.К71-335-2004	МЭК/IEC 60502	CENELEC HD 62051:1996	ANSI/ICEA A S-94-649-2004
Сплошной контроль ЧР на строительных длинах	2,5U ₀ Q ≤ 10пКл	1,73U ₀ Q < 10пКл	2,5U ₀ Q ≤ 5пКл	4U ₀ Q ≤ 5пКл
Сплошной контроль строительных длин электрическим напряжением	4,3U ₀ 10 мин.	3,5U ₀ 5 мин.	3,5U ₀ 5-15 мин.	4U ₀ 5 мин.

Таблица 2 – Действующие требования к поточным электрическим испытаниям кабелей высокого и сверхвысокого напряжения

Вид испытаний	Россия	Европа		США
	ТУ16-705-495-2006	МЭК/IEC 60840	МЭК/IEC 62067	ANSI/ICEA S-108-720-2004
Сплошной контроль ЧР на строительных длинах	1,5U ₀ Q < 5пКл	1,5U ₀ Q < 10пКл	1,5U ₀ Q < 10пКл	2U ₀ Q < 5пКл
Сплошной контроль строительных длин электрическим напряжением	2,5U ₀ 30 мин.	2,5U ₀ 30 мин.	(2,0-2,5)U ₀ 30-60 мин.	(2,0-2,5)U ₀ 15-60 мин.

Приемо-сдаточные испытания служат основным видом испытаний, который позволяет контролировать качество выпускаемой продукции на кабельном предприятии. Такой контроль в подавляющем большинстве осуществляется на строительных длинах и практически является сплошным. К испытаниям кабели предъявляют партиями. За партию принимают кабели одной марки, напряжения, сечения и длины. При напряжении 6...35 кВ, длина испытуемых кабелей должна составлять не менее 350 м, а при напряжении 45...330 кВ – не менее 400 м.

Приемо-сдаточные испытания кабелей на напряжение 6... 330 кВ проводятся в следующем объеме.

1. Проверка конструктивных элементов и основных размеров на соответствие требованиям технических условий. Путем подбора и осмотра каждого конца кабеля на длине не менее 300 мм проводится проверка конструкции токопроводящих жил, толщины изоляции и отсутствия дефектов на ее

поверхности, конструкции экранов, скрутки изолированных жил и наличия заполнения, наличие обмотки лентами, толщины подушки, конструкции брони, толщины наружной оболочки и отсутствия дефектов на ее поверхности.

Проверку материалов, применяемых для изготовления кабелей, на соответствие требованиям нормативной документации осуществляют при входном контроле материалов. Правильность применения материалов проверяют по заполненной сопроводительной документации в ходе прямо-сдаточных испытаний.

2. Проверка герметичности оболочки осуществляется при ее наложении в технологической линии по результатам испытаний высоким электрическим напряжением на проход в соответствии с ГОСТ 2990. Наружная оболочка должна выдержать испытание одним из следующих видов напряжений:

- переменного напряжения промышленной частоты амплитудой 6 кВ на 1 мм толщины оболочки;
- импульсного напряжения с частотой следования не менее 50 Гц и пиковым значением 6 кВ на 1 мм толщины оболочки;
- постоянного напряжения 9 кВ на 1 мм номинальной толщины оболочки.

Напряжение должно быть приложено между испытательным электродом и медным экраном или броней. Оболочка должна быть герметичной, то есть в процессе испытаний на проход установленным напряжением не должно наблюдаться ее пробоев.

3. Проверка маркировки и упаковки проводится внешним осмотром. Маркировка и упаковка должна соответствовать установленным требованиям.

4. Определение электрического сопротивления токопроводящей жилы и медного экрана допускается проводить на образцах длиной не менее 1 м с помощью моста постоянного тока по ГОСТ 7229. Измеренное сопротивление пересчитывается на сопротивление жилы или медного экрана длиной 1 км при температуре 20°C и не должен превышать установленного нормативной документацией значения (ГОСТ 22483).

5. Определение уровня частичных разрядов проводится на строительных длинах при напряжении $1,5U_0$. Для кабелей 6... 330 кВ их уровень не должен превышать 10пКл.

6. Испытание переменным напряжением промышленной частоты. Кабели на напряжение 6... 35 кВ с номинальным напряжением 6, 10, 15, 20, 30 и 35 кВ должны выдержать в течение 10 минут испытание напряжением, соответственно, 15, 25, 35, 50, 76 и 88 кВ. Кабели на напряжение 45... 150 кВ с номинальным напряжением 45, 60, 110, 132 и 150 кВ должны выдержать в течение 30 мин. испытание напряжением, соответственно, 65, 90, 160, 190 и 218 кВ. Кабели на напряжение 220 кВ должны выдержать испытания напряжением 318 кВ в течение 30 мин.. а кабели на 330 кВ должны выдержать испытание напряжением 420 кВ в течение 60 мин. Считается, что кабель вы-

держал испытание, если не произошло пробоя изоляции. Пробой концевых заделок отказом не считается.

В процессе приемо-сдаточных испытаний проводят испытание на тепловую деформацию изоляции устанавливает ее стойкость к тепловой деформации при воздействии температуры 200°С в течение 15 мин., водопоглощения при температуре 85°С в течение 14 суток и усадки при температуре 130°С в течение 6 часов. Принимается, что изоляция выдержала испытания, если ее механические и физико-химические свойства соответствуют требованиям технических условий на кабель.

Кроме того предусмотрены испытания кабелей после их прокладки. Они должны выдерживать испытание одним из способов, указанных ниже:

– испытание напряжением переменного тока частотой от 20 Гц до 300 Гц, приложенным между жилой и землей, в течение 1 ч. Величина испытательного напряжения 180 кВ для кабелей на номинальное напряжение 220 кВ и 250 кВ для кабелей на номинальное напряжение 330 кВ;

– испытание номинальным напряжением сети в течение 24 ч.

Способ испытания выбирается по согласованию с потребителем. Рекомендуется испытание оболочки кабелей, проложенных в земле, в течение 1 мин постоянным напряжением 10 кВ, приложенным между медным экраном и заземлителем.

Выводы. Решена проблема разработки нормативной базы и основных электрических испытаний отечественных образцов кабелей с изоляцией из шитого полиэтилена на напряжение 6...330 кВ. Созданный испытательный комплекс позволяет испытывать кабели электрическим напряжением до 500 кВ. Проведенные испытания показали, что уровень частичных разрядов разработанных кабелей на барабанах не превышает 10 пКл с вероятностью 0,95.

Список литературы. 1. Мещанов Г.И. Кабели на напряжение 10... 500 кВ // Кабели и провода. – М.: 2008. – С. 32-38. **2.** Masayuki H. Crossequipment evaluations og partial discharge measurement // IEEE Trans. On dielectric and electrical Insulation. – 2008. – V. 15, № 2. – PP. 505-517. **3.** Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 528 С.

Bibliography (transliterated.) 1. Meschanov G.I. Kabeli na napryaszenie 10... 500 kV Kabeli i pro voda. – М.: 2008. – 32. 38. **2.** Masayuki H. Cross-equipment evaluations of partial discharge measurement. – IEEE Trans on dielectric and electrical Insulation. – 2008. – V. 15, № 2. – 505-517. **3.** Kutchinskiy G.S. Chastichnie razrjady v visokovoltnih konstruktziyah. – L.: Energiya, 1979. – 224.

Надійшла (received) 10.02.2014

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

С.Ю. АНТОНЕЦ, инженер, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков;

В.В. ЗОЛОТАРЕВ, канд. техн. наук, директор по внешнеэкон. связям, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков;

С.В. БУЗЬКО, канд. техн. наук, вед. специалист, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков;

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

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ НОВЫХ ТИПОВ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Приведены результаты исследований по разработке измерений уровня частичных разрядов силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Разработаны устройства испытаний электрическим напряжением до 500 кВ силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Рассмотрены особенности практического применения различных методов к измерению частичных разрядов в силовых кабелях, которые отличаются большой электрической емкостью. Приведены результаты первичных измерений уровня частичных разрядов в разработанных ПАО «Завод Южкабель» кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 300 кВ.

Ключевые слова: силовой кабель, сшитый полиэтилен, частичные разряды.

Анализ литературы. Возрастающие требования, предъявляемые к каналам передачи электрической мощности привели в последнее время к созданию силовых кабелей с нагревостойкой полиэтиленовой изоляцией на напряжение от 6...10 кВ до 500 кВ [1]. Такие кабели на напряжение до 330 кВ разработаны и выпускаются в Украине ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ». Для обеспечения качества кабелей на этапе приемо-сдаточных испытаний предусматривается контроль уровня частичных разрядов (ЧР) в изоляции. Однако, в силу высокой емкости отрезков кабеля на барабанах далеко не все известные способы [2, 3] измерения ЧР можно применять к такого рода объектам.

Постановка задачи. Необходимость сплошного контроля уровня ЧР выпускаемых отечественных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6...330 кВ потребовали создания соответствующего измерительного комплекса. В соответствии с существующими требованиями, на испытуемом объекте емкостью порядка долей микрофарады необходимо обеспечить помехозащищенность измерительного комплекса и регистрацию частичных разрядов с уровнем 1...10 пКл.

Решение задачи. Особенностью испытаний современных конструкций

силовых кабелей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения со шшитым полиэтиленом, как уже упоминалось, является необходимость их сплошного поточного контроля электрическим напряжением, измерение уровня частичных разрядов, а для кабелей СВН – также и измерение тангенса угла диэлектрических потерь в изоляции, что должно обеспечить основной контроль качества их изоляции и ресурс работы в электроэнергетических сетях на протяжении не мене 30 лет. Таким образом вопросы испытаний этих кабелей высоким напряжением и измерения в них уровня частичных разрядов напрямую связаны с их качеством и эксплуатационными показателями. Перейдем к более подробному анализу этих вопросов, с учетом того, что данные объекты испытаний имеют повышенную емкость.

На сегодняшний день существуют следующие основные группы методов регистрации частичных разрядов [2].

1. Химический метод, основанный на применении флуоресцентных ионных датчиков.
2. Оптический метод с применением волоконной оптики для регистрации светового излучения ЧР.
3. Акустический метод, позволяющий регистрировать акустические колебания, возникающие вследствие развития ЧР.
4. Электрический метод, в частности с использованием накладных электродов (Foil electrode method) и детектирования измерительным импедансом (Detection impedance method).
5. Электромагнитный метод улавливания электромагнитных излучений с помощью различных антенн.

Группы методов 1, 2, 3 и 5 или имеют ограниченное применение, как то применение, например, для жидких и газообразных диэлектриков, или вообще относятся к методам обнаружения места возникновения ЧР. Наиболее широко употребительным методом обнаружения ЧР в кабельной изоляции является электрический метод DIM, имеющий высокую чувствительность (порядка долей пикокулон) и хорошо развитую аппаратную базу для измерений в первую очередь уровня ЧР на объектах высоких и сверхвысоких напряжений.

Понятие частичного разряда в изоляции охватывает местные разряды на поверхности или внутри изоляции в виде короны, скользящих разрядов или неполных пробоев отдельных включений. Если представить схему твердого диэлектрика с частичным, например, газовым включением, имеющим емкость C_B (рис. 1, а), то единичный пробой этого включения будет сопровождаться прохождением через включение некоторого заряда Q , что приводит к изменению напряжения ΔU_X на внешних электродах всего образца емкостью C_X

$$\Delta U_X = Q_{\text{ЧР}}/C_X. \quad (1)$$

Если $C_A \geq C_B, C_D$, то заряд Q , проходящий через включение, равен

$$Q = (C_B + C_D) \Delta U_B, \quad (2)$$

где ΔU_B – изменение напряжения на включении.

Сам заряд Q непосредственно измерить не удастся, так как его прохождение связано с процессами внутри самого диэлектрика.

С другой стороны, при возникновении ЧР и уменьшении напряжения на емкости C_B на величину ΔU_B напряжение на внешних электродах уменьшится на величину ΔU_X и будет обусловлено протеканием заряда $Q_{чр}$. Тогда условие равенства Q и $Q_{чр}$ дает [3]

$$Q_{чр} = \Delta U_x C_x = Q \frac{C_d}{C_d + C_B}. \quad (3)$$

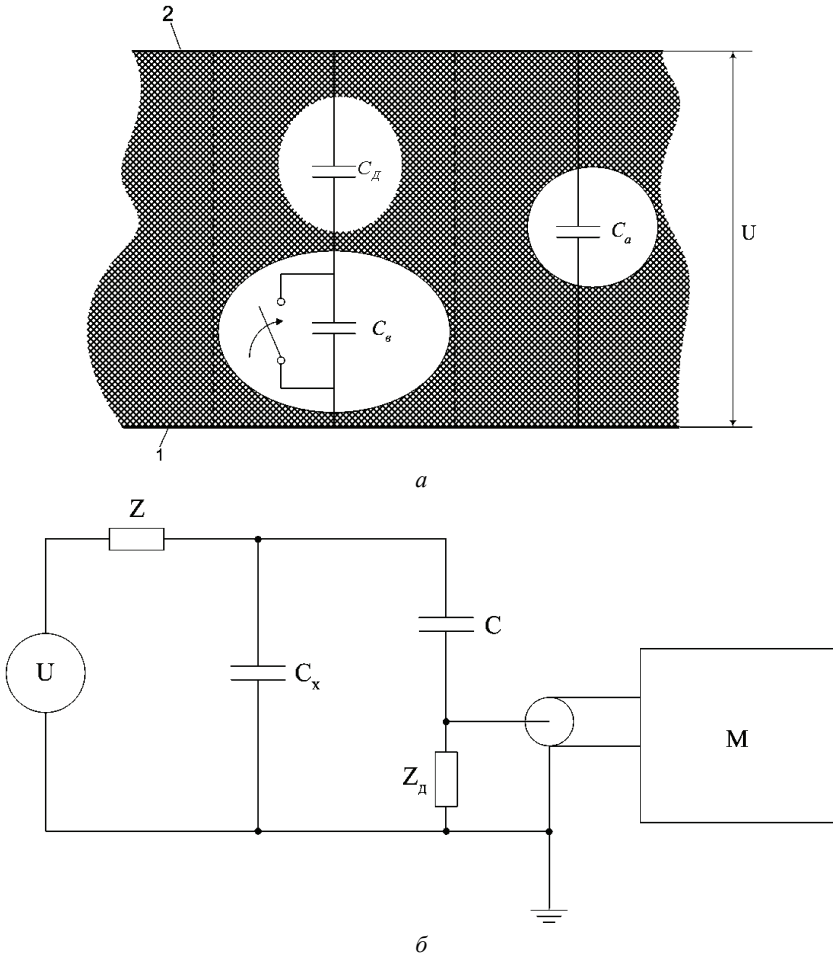


Рисунок 1 – Упрощенные эквивалентные схемы замещения диэлектрика с включением (а) и измерительной цепи измерения ЧР (б): C_B – емкость включения; C_d – емкость диэлектрика, расположенного последовательно с включением; C_A – емкость остальной части диэлектрика; 1,2 – внешние электроды для подачи напряжения;

Величина $Q_{\text{ЧР}}$ является кажущимся зарядом частичного разряда. Как видно из (3), кажущийся заряд ЧР – это такой заряд, который будучи мгновенно введен между внешними электродами, наложенными на испытуемый объект, вызовет такое же мгновенное изменение напряжения между его выводами, как и заряд Q реального частичного разряда [3].

Следует заметить, что изменение $Q_{\text{ЧР}}$ сопряжено с большими техническими трудностями. Так, например, при существующих европейских требованиях в кабелях СН, ВН и СВН уровень ЧР, то есть значение $Q_{\text{ЧР}}$ не должно превышать значения 10, а иногда и 5 пКл. Тогда, согласно (3), при обычных значениях емкостей кабелей $C_{\text{Х}}$ порядка долей микрофарады, изменение напряжения на ней будет составлять несколько десятых долей милливольт и оно будет тем ниже, чем выше емкость испытуемого отрезка кабеля, т.е. чем больше его длина. При этом упомянутое изменение напряжения необходимо выделить на фоне испытательного напряжения U которое для кабелей СВН составляет сотни киловольт. Однако, несмотря на перечисленные трудности, представляется наиболее целесообразным в данном случае применение схемы регистрации уровня ЧР в кабелях с использованием именно ДИМ-метода (рис. 1, б). Такая схема включает в себя источник переменного высокого напряжения U промышленной частоты, испытуемый объект емкостью $C_{\text{Х}}$, делитель с емкостью высоковольтного плеча C много меньшей $C_{\text{Х}}$ и низковольтным плечом $Z_{\text{д}}$, разделительный высоковольтный фильтр Z и систему регистрации M [2].

Особо следует остановиться на выборе испытательной схемы питания высоким напряжением. Трудность здесь состоит в том, что схема с применением высоковольтного трансформатора непосредственно подключенного к испытуемому кабелю емкостью 0,5 мкф, например, при сверхвысоком напряжении 500 кВ и промышленной частоты $f = 50$ Гц требует мощности трансформатора не менее 39,2 МВА. Такое оборудование в Украине не выпускается. Выпускаемые еще во времена бывшего СССР Московским электротехническим заводом наиболее мощные повышающие испытательные трансформаторы типа ИОМ-100/100 имели напряжение вторичной обмотки всего 100 кВ эфф. и мощность 100 кВА и допускали полную нагрузку при таком напряжении не более 5 мин. Не решает данную задачу, как видно, и применение каскадных схем с использованием испытательных трансформаторов фирмы TUR бывшей ГДР, которые имели достаточное высокое напряжение 600...2250 кВ, но недостаточную для таких испытаний мощность 1,5...3,6 МВА. Поэтому, наиболее приемлемой являются схемы испытаний кабелей ВН и СВН с использованием последовательного резонанса. Ранее такие схемы применялись очень редко и, в основном, для маслонаполненных кабелей, которые вследствие небольших длин (порядка сотен метров) соответственно имели и небольшую емкость, что требовало относительно невысоких мощностей испытательного оборудования.

С освоением производства кабелей СВН с пластмассовой изоляцией, как показывает анализ, применение резонансных схем практически не имеет альтернативы при строительных длинах кабелей порядка километра и более. Для

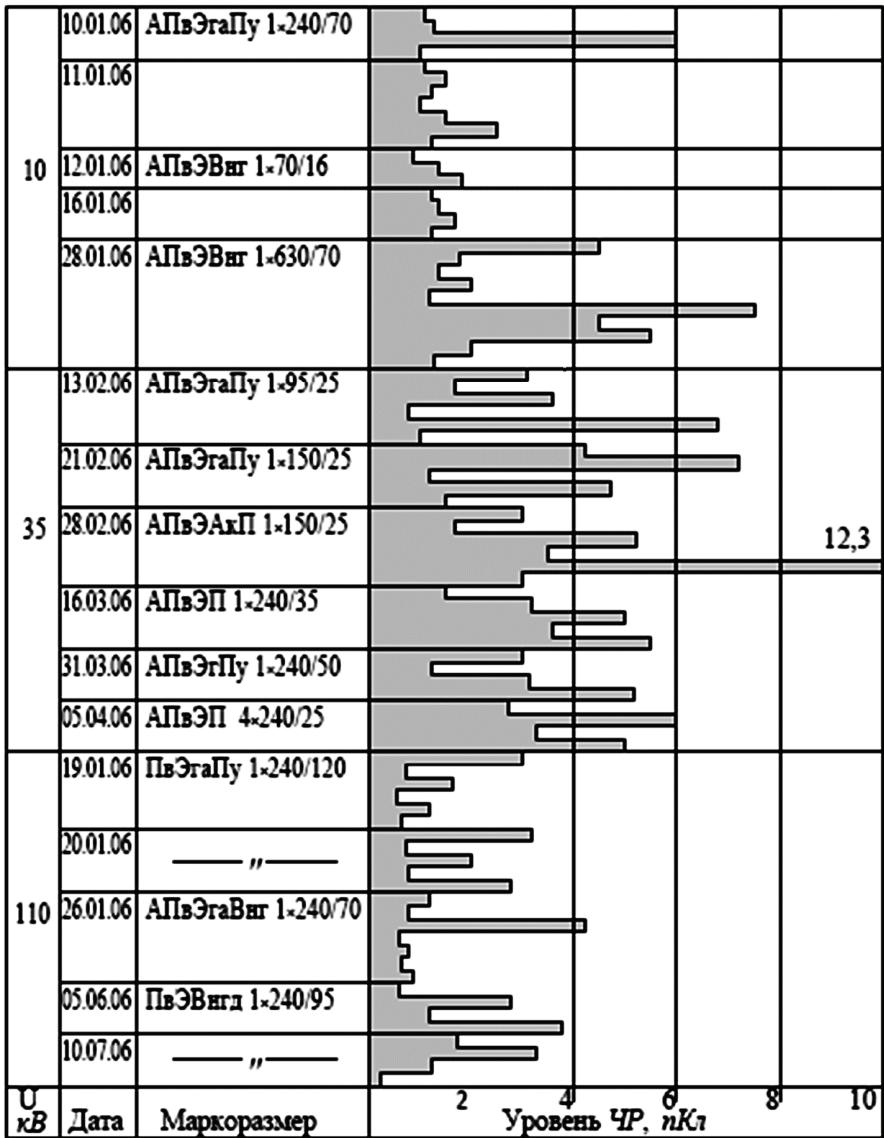


Рисунок 2 – Результаты первичных измерений ЧР в изоляции разработанных отечественных образцов кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

испытаний было выбрано оборудование зарубежных фирм HIGHVOLT (ФРГ), HIPOTRONICS (США) и др. Они, как правило, предлагают ряды номинальных параметров испытательного и измерительного оборудования. Была решена задача определения параметров испытательной и измерительной схемы применительно к типоразмерам выпускаемых кабельным предприятием силовых кабелей, подлежащих поточным испытаниям высоким напряжением и определения уровня частичных разрядов на этом напряжении, а также определения тангенса угла диэлектрических потерь кабелей сверхвысокого напряжения.

В целом обеспечение поточных испытаний кабелей ВН и СВН электрическим напряжением с одновременным измерением уровня ЧР, а на напряжении более 150 кВ – также и измерения угла диэлектрических потерь, потребовало создания испытательного высоковольтного комплекса мощностью от единиц до десятков мегавольтампер. На таких высоких напряжениях становятся существенными весьма малые токи, что требует, помимо всего прочего, также и установления зависимостей распределения электрического поля в многослойном неидеальном диэлектрике, из которого сделана изоляция, для расчета тангенса угла диэлектрических потерь.

Был выполнен анализ резонансной схемы замещения с учетом собственных параметров возбуждающего трансформатора, реактора, высоковольтного фильтра низких частот и испытуемого отрезка кабеля. Показано, что напряжение возбуждения растет при этом с уменьшением рабочего зазора реактора, что является следствием снижения добротности контура, в том числе и из-за увеличения активных потерь в элементах, например, в концевой муфте для подключения кабеля. Испытания коротких отрезков кабеля обеспечивались за счет введения в схему дополнительной емкости с малым уровнем ЧР. Результаты исследований были положены в основу разработки методик приемно-сдаточных испытаний.

В соответствии с результатами проведенных исследований был построен испытательный комплекс для испытаний кабелей напряжением до 500 кВ, измерения уровня частичных разрядов и тангенса угла диэлектрических потерь кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Результаты первичных измерений частичных разрядов в изоляции отечественных образцов экранированных кабелей при напряжении 10, 35 и 110 кВ приведены на рис. 2. Из него видно, что только в одном из 73 барабанов кабеля уровень частичных разрядов превысил допустимое значение 10 пКл.

Выводы. Наиболее приемлемым для измерения уровня ЧР в экранированных кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена с высоким значением емкости (порядка долей микрофарады) является метод их детектирования с помощью делителя напряжения. В разработанном на этой основе измерительном комплексе удалось достичь собственного уровня шумов менее 1 пКл, что позволило провести измерения ЧР с допустимым уровнем до 10 пКл.

Список литературы. 1. Мещанов Г.И. Кабели на напряжение 10...500 кВ // Кабели и провода. – М.: 2008. – С. 32-38. **2.** Masayuki H. Crossequipment evaluations of partial discharge measurement // IEEE Trans. On dielectric and electrical Insulation. – 2008. – V. 15, № 2. – PP. 505-517. **3.** Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 528 С.

Bibliography (transliterated): 1. Meschanov G.I. Kabeli na napryazhenie 10...500 kV Kabeli i provoda. – M.: 2008. – 32-38. **2.** Masayuki H. Crossequipment evaluations of partial discharge measurement IEEE Trans. On dielectric and electrical Insulation. – 2008. – V. 15, № 2. – 505-517. **3.** Kuchinskij G.S. Chastichnye razryady v vysokovol'tnyh konstrukciyah. – L.: Energiya, 1979. – 528.

Надійшла (received) 03.04.2014

УДК 621.315

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

Т.Ю. АНТОНЕЦ, инженер, ПАО «Завод «Южкабель», Харьков;

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

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

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ТИПЫ ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫХ КАБЕЛЕЙ РАЗРАБОТКИ ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ» И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ

Приведены основные направления разработок пожаробезопасных кабелей и проводов, а также требования к ним по пожарной безопасности. Разработаны кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена не распространяющие горение с низким дымогазовыделением, не содержащие галогенов; огнестойкие кабели, содержащие барьер из смоляной ленты, выдерживающие температуру не менее 700С. Выпускаемая ПАО «Завод Южкабель» кабельная продукция соответствует требованиям украинских стандартов по пожарной безопасности.

Ключевые слова: силовые кабели, сшитый полиэтилен, пожаробезопасность.

Анализ источников. Все более широкое использование кабельной продукции для распределения электроэнергии ставит сегодня на одно из первых мест проблему ее пожарной безопасности. Установлено, что 50% пожаров возникает из-за неисправности кабелей и проводов. В последнее время этому вопросу, как за рубежом [1, 2], так и в Украине уделяется большое внимание и, особенно, в части требований, предъявляемых к пожаробезопасности кабелей и проводов [3].

© В.М. Золотарев, Т.Ю. Антоненц, В.П. Карпушенко, А.А. Науменко, 2014

Постановка проблемы. В связи с всевозрастающими требованиями по пожарной безопасности и освоением новых технологий наложения изоляции, потребовалась разработка отечественных образцов пожаробезопасных кабелей, удовлетворяющих требованиям мировых стандартов и требованиям отечественной нормативной базы по этим показателям [3].

Решение проблемы. С учетом современных требований и для удовлетворения потребностей отечественной электроэнергетики и экспорта, ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ» были разработаны основные типы силовых коаксиальных экранированных энергонасыщенных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Основным элементом таких кабелей является трехслойная изоляционная конструкция «полупроводящий экран по жиле – слой высококачественного изоляционного полиэтилена – полупроводящий экран по жиле». Она накладывается на медную или алюминиевую токопроводящую жилу сечением до 2000 мм² строенной экструзионной головкой и вулканизируется затем в наклонной вулканизационной линии в среде сухого азота при давлении до 15 атмосфер и температуре около 450 °С. Это позволило освоить производство кабелей в диапазоне рабочих напряжений от 6 до 330 кВ.

Соответственно вышеизложенному, пожаробезопасные кабельные изделия, освоенные ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», подразделяются на следующие типы исполнения:

- не распространяющие горение при одиночной прокладке (без обозначения исполнения);
- не распространяющие горение при прокладке в пучках (исполнение -нг);
- не распространяющие горение при прокладке в пучках с пониженным дымо- и газовыделением (исполнение – нгд);
- не распространяющие горение при прокладке в пучках и не выделяющие коррозионно-активных газообразных продуктов при горении и тлении (исполнение – нг – HF; HF – halogen free – не содержащие галогенов);
- огнестойкие, не распространяющие горение при прокладке в пучках, с пониженным дымо- и газовыделением (исполнение нгд – FR; FR – fire resistance – огнестойкость);
- огнестойкие, не распространяющие горение при прокладке в пучках и не выделяющие коррозионно-активных газообразных продуктов при горении и тлении (исполнение – нг – FRHF);
- не распространяющие горение при прокладке в пучках, с пониженным дымо- и газовыделением и с низкой токсичностью продуктов горения (исполнение – нг – LSTx);
- не распространяющие горение при прокладке в пучках, не выделяющие коррозионно-активных газообразных продуктов при горении и тлении и с низкой токсичностью продуктов горения (исполнение – нг- HFLTx).

Нормативную базу на разработанные кабели (провода) повышенной пожаробезопасности можно поделить на следующие основные группы.

Нормативная документация на кабели (провода) пониженной горючести, обладающие стойкостью к распространению пламени при прокладке в

пучках (обозначение «нг»). Сюда относятся:

- а) технические условия на силовые и контрольные кабели:
 - ТУ У 31.3-00214534-009-2002 ... ТУ У 31.3-00214534-060:2011;
 - ТУ У 31.3-00214534-061:2008;
- б) технические условия на кабели для сигнализации и блокировки:
 - ТУ У 31.3-00214534-008-2001;
- в) технические условия на кабели волоконно-оптические:
 - ТУ У 31.3-00214534-036-2004;
 - ТУ У 31.3-00214534-047-2005;
 - ТУ У 31.3-00214534-050:2005;
- г) технические условия на провода установочные и осветительные:
 - ТУ У 31.3-00214534-056:2006;
 - ТУ У 31.3-00214534-059:2008.

Нормативная документация на кабели пониженной пожарной опасности, обладающие стойкостью к распространению пламени при прокладке в пучках и низкой дымообразующей способностью при горении и тлении (обозначение «нгд»).

К ней относятся технические условия на силовые кабели:

ТУ У 31.3-00214534-008-2001 ... ТУ У 31.3-00214534-060:2011.

Нормативная документация на огнестойкие кабели повышенной пожаробезопасности, стойкие к распространению пламени при прокладке в пучках, низкой дымообразующей способности при горении и тлении, а также сохраняющие работоспособность в условиях воздействия пламени (обозначение «нгд-FR»): ТУ У 31.3-00214534-055:2006.

Нормативная документация на кабели, не содержащие галогенов. Сюда относятся:

а) технические условия на кабели пониженной горючести, не содержащие галогенов, стойкие к распространению пламени при прокладке в пучках, низкой дымообразующей способности при горении и тлении с низкой коррозионной активностью продуктов горения (обозначение «нг-HF»): ТУ У 31.3-00214534-056:2006 ... ТУ У 31.3-00214534-060:2011.

б) технические условия на огнестойкие кабели, не содержащие галогенов, стойкие к распространению пламени при прокладке в пучках, низкой дымообразующей способности при горении и тлении, с низкой коррозионной активностью продуктов горения, сохраняющие работоспособность в условиях воздействия пламени (обозначение «нг-FRHF»): ТУ У 31.3-00214534-069:2011.

К разработанным электрическим кабелям предъявляются высокие требования по безопасной эксплуатации. В частности, они должны иметь высокие свойства пожаробезопасности и удовлетворять целому ряду требований по пожарной безопасности, которые регламентируются международными стандартами и отечественными нормативными документами.

К первостепенным относят следующие свойства пожаробезопасности кабелей, предназначенных для открытой прокладки в кабельных сооружениях.

Нераспространение горения – способность кабеля самостоятельно прекращать горение после удаления источника возгорания. Количественным показателем нераспространения горения служит длина участка кабеля, поврежденного пламенем с нормированными характеристиками. Длина этого участка нормируется для одного кабеля (одиночная прокладка) и для группы параллельно проложенных кабелей (групповая прокладка) с учетом объема массы горючего вещества в их конструкции.

Огнестойкость – способность кабеля сохранять работоспособность при прямом воздействии открытого пламени с определенной температурой. Количественным показателем огнестойкости служит время, в течение которого параметры, определяющие работоспособность, находятся в установленных пределах.

Дымообразование – способность кабеля образовывать дым при горении и тлении. Показателем дымообразования является задымленность пространства установленного объема. Задымленность измеряют путем изменения оптической плотности среды. Принимается, что кабель, например, имеет низкую дымообразующую способность, если при его горении и тлении в камере объемом 27 м³ снижение светопропускания не превышает 40%. Дымообразование, как технический показатель, определяет возможность использования средств пожаротушения и проведения спасательных операций в закрытых помещениях.

Коррозионная активность продуктов газовой выделения – это свойство материалов конструкции кабеля выделять при горении газообразные вещества, которые соединяются с парами воды в воздухе, образуют кислоты или щелочи, способные вызывать коррозию металлоконструкций и коррозионное повреждение электронного оборудования. Ущерб от таких коррозионных разрушений может значительно превышать стоимость сгоревших кабелей. К наиболее активным газообразным веществам, выделяемым при горении и разложении различных полимерных композиций в конструкции кабеля, относятся такие высокоактивные компоненты, как бром, фтор, диоксид серы и др. Количественным показателем коррозионной активности выделяемых при горении газообразных продуктов является процентное содержание хлористого водорода, электрическая проводимость и кислотное число (рН) водного раствора этих адсорбированных газообразных продуктов.

Токсичность продуктов сгорания – это способность применяемых в кабелях полимерных композиций образовывать при горении удушающие и токсичные вещества, которые при вдыхании могут вызвать повреждение дыхательных путей или приводить к летальному исходу. К таким веществам относят оксид углерода (угарный газ), оксид азота, сероводород, хлористый водород, формальдегиды и др. Особенно опасным является угарный газ. Он образуется при горении практически всех материалов и очень часто является

причиной отравления и смерти людей и животных при пожарах. Количественным показателем токсичности является такое количество сгораемого материала, которое в единице замкнутого пространства выделяет продукты сгорания, достаточные для гибели 50% подопытных животных. Чем ниже значение этого показателя, тем более опасен сгораемый материал по токсичности продуктов сгорания.

Таблица 1 – Классы по стойкости к распространению пламени вдоль кабелей (проводов) при их одиночной прокладке

Класс кабеля (провода) по стойкости к распространению пламени	Требования по стойкости к распространению пламени кабеля (провода)	Идентификационное обозначение (первая цифра маркировочных данных по условиям пожарной безопасности)
Нестойкий*	Не нормируется	0
Стойкий	По ДСТУ 4216 или ДСТУ 4217	1

* Этот класс не распространяется на кабели и изолированные провода внутренних электроустановок.

Таблица 2 – Классы и категории по стойкости к распространению пламени при условии прокладки в пучках

Класс кабеля (провода) по стойкости к распространению пламени	Категория кабеля (провода) по стойкости к распространению пламени		Максимальная длина обуглившейся части (допустимая граница распространения пламени L, м)	Идентификационное обозначение (вторая цифра маркировочных данных по условиям пожарной безопасности)
	обозначение	по ДСТУ		
Нестойкий или ненормированный	-	-	$L \leq 1,5$	0
	AF-R	4237-3-21	$L \leq 1,5$	1
	A	4237-3-22		2
B	4237-3-23	3		
Стойкий	C	4237-3-24		4
	D	4237-3-25		5

Кабельные изделия (кабели или изолированные провода) классифицируются по следующим показателям пожарной безопасности в соответствии с гармонизированным с международными требованиями стандартом ДСТУ 4809:2007:

- по стойкости к распространению пламени при условии одиночной прокладки (табл. 1.);
- по стойкости к распространению пламени при условии прокладки в пучках (табл. 2.);
- по токсичности продуктов сгорания неметаллических элементов (табл. 3.);

- по дымообразующей способности при тлении неметаллических элементов (табл. 4.);
- по дымообразующей способности вовремя пламенного горения (табл. 5.);
- по коррозионной активности продуктов горения неметаллических элементов (табл. 6.);
- по способности к сохранению целостности цепей в условиях стандартного температурного режима (табл. 7.);
- по способности сохранения целостности цепи при условии воздействия пламени, температура которого не менее чем 750°C (табл. 8.);
- по способности сохранения целостности цепи при условии комбинированного воздействия пламени, температура которого не менее чем 830°C , и механического удара (табл. 9.).

Таблица 3 – Классы по токсичности продуктов сгорания неметаллических элементов

Класс кабеля (провода) по токсичности продуктов сгорания их неметаллических элементов	Показатель токсичности продуктов сгорания H_{cl50} по длительности экспозиции 30 мин., $\text{г}/\text{м}^3$	Идентификационное обозначение (третья цифра маркировочных данных по условиям пожарной безопасности)
Тк О или ненормированный	$H_{cl50} \leq 13$	0
Тк 1	$13 < H_{cl50} \leq 40$	1
Тк 2	$40 < H_{cl50} \leq 120$	2
Тк 3	$H_{cl50} > 120$	3

Таблица 4 – Классы по дымообразующей способности при тлении неметаллических элементов

Класс кабеля (провода) по дымообразующей способности во время тления их неметаллических элементов	Коэффициент дымообразования D_m , $\text{м}^2/\text{кг}$	Идентификационное обозначение (четвертая цифра маркировочных данных по требованиям пожарной безопасности)
ДТкО или ненормированный	$D_m \leq 500$	0
ДТк1	$50 < D_m \leq 500$	1
ДТк2	$D_m \leq 50$	2

Таблица 5 – Классы по дымообразующей способности во время пламенного горения

Класс кабеля (провода) по дымообразующей способности во время пламенного горения	Минимальный световой поток I_t , проходящий через задымленную среду, %	Идентификационное обозначение (пятая цифра маркировочных данных по требованиям пожарной безопасности)
ДПкО или ненормированный	$I_t < 45$	0
ДПк1	$45 \leq I_t < 60$	1
ДПк2	$I_t \geq 60$	2

Таблица 6 – Классы по коррозионной активности продуктов горения неметаллических элементов

Класс кабеля (провода) по коррозионной активности продуктов сгорания	Количество галогеноводородов M_r , мг/г	Водородный показатель pH	Удельная электропроводность C , мкСм/мм	Идентификационное обозначение (шестая цифра маркировочных данных по требованиям пожарной безопасности)
КкО или ненормированный	$M_r > 150$	$pH < 4,3$	$C \square 10$	0
Кк 1	$M_r \leq 150$			1
Кк 2			$pH \geq 4,3$	$C \leq 10$

Таблица 7 – Классы по способности к сохранению целостности цепей в условиях стандартного температурного режима

Класс кабеля (провода) по способности к сохранению целостности цепей в условиях стандартного температурного режима	Промежуток времени $t_{ек}$, в течение которого сохраняется целостность цепей, мин.	Идентификационное обозначение (седьмая цифра маркировочных данных по требованиям пожарной безопасности)
Неспособный к сохранению целостности цепей или ненормированный	$t_{ек} < 15$	0
Ек 15	$15 < t_{ек} < 30$	1
Ек 30	$30 \leq t_{ек} < 45$	2
Ек 45	$45 \leq t_{ек} < 60$	3
Ек 60	$60 \leq t_{ек} < 90$	4
Ек 90	$t_{ек} \geq 90$	5

Таблица 8 – Классы по способности к сохранению целостности цепи при условии воздействия пламени, с температурой не менее чем 750 °С

Класс кабеля (провода) по способности к сохранению целостности цепей в условиях влияния пламени с температурой не менее 750 °С	Промежуток времени t_{FE} , в течение которого сохраняется целостность цепей, мин.	Идентификационное обозначение (восьмая цифра маркировочных данных по требованиям пожарной безопасности)
Не способный к сохранению целостности цепей или ненормированный	$t_{FE} < 15$	0
FE 15	$15 \leq t_{FE} < 30$	1
FE 30	$30 \leq t_{FE} < 45$	2
FE 45	$45 \leq t_{FE} < 60$	3
FE 60	$60 \leq t_{FE} < 90$	4
FE 90	$90 \leq t_{FE} < 120$	5
FE 120	$120 \leq t_{FE} < 150$	6
FE 150	$150 \leq t_{FE} < 180$	7
FE 180	$t_{FE} > 180$	8

Таблица 9 – Классы по способности к сохранению целостности цепей в условиях комбинированного воздействия пламени с температурой не менее 830 °С и механического удара

Класс кабеля (провода) к сохранению целостности в условиях комбинированного воздействия пламени с температурой не менее 830 °С и механического удара	Промежуток времени t_{FME} , в течение которого сохраняется целостность цепей, мин.	Идентификационное обозначение (девятая цифра маркировочных данных по требованиям пожарной безопасности)
Не способный к сохранению целостности цепей или ненормированный	$t_{FME} < 15$	0
FME 15	$15 \leq t_{FME} < 30$	1
FME 30	$30 \leq t_{FME} < 45$	2
FME 45	$45 \leq t_{FME} < 60$	3
FME 60	$60 \leq t_{FME} < 90$	4
FME 90	$90 \leq t_{FME} < 120$	5
FME 120	$120 \leq t_{FME} < 150$	6
FME 150	$150 \leq t_{FME} < 180$	7
FME 180	$t_{FME} \geq 180$	8

В нормативной документации для силовых кабелей должен быть установлен также допустимый ток и время короткого замыкания. В состав основного маркирования кабеля (провода) должно быть добавлено дополнительное маркирование идентификационных обозначений по требованиям пожарной безопасности. Маркировка должна быть нанесена на кабельное изделие, а в случае невозможности этого – указана в сопроводительной документации. Структура и порядок дополнительных маркировочных данных кабеля (провода) по требованиям пожарной безопасности, которые состоят из идентификационных обозначений, осуществляется в соответствии с табл. 1. – табл. 9.

Пример дополнительного обозначения по требованиям пожарной безопасности: ПБ 123122580 – кабель, стойкий к распространению пламени при условии одиночной прокладки, категории А по стойкости к распространению пламени в пучках, принадлежащий к классам Тк3 по токсичности продуктов сгорания, ДТк1 и ДПк2 по дымообразующей способности, Кк2 по коррозионной активности продуктов сгорания Ек90 и FE 180 по способности к сохранению целостности цепей в условиях огневого воздействия.

Выводы. С учетом требований мировых стандартов и требований отечественной нормативной базы решена проблема разработки и промышленного выпуска отечественных образцов пожаробезопасных кабелей и проводов с вулканизированной полиэтиленовой нагрестойкой изоляцией. ПАО «ЗАВОД «ОЖ-КАБЕЛЬ» разработаны и выпускаются пожаробезопасные провода, а также пожаробезопасные кабели на рабочее напряжение 6...330 кВ, удовлетворяющие всем современным требованиям по пожарной безопасности.

Список литературы: 1. Мещанов Г.И. Развитие производства новых типов пожаробезопасных кабелей в России // Кабели и провода. – 2007. – № 4. – С. 5-9. 2. Байер Г. Нанокomпозиты как огнезащитная система // Кабель-news. – 2013. – № 5. – С. 60-64. 3. Изольовані проводи та кабелі. Вимоги до пожежної безпеки. ДСТУ 4809:2007. – К.: 2007. – 14 С.

Bibliography (transliterated). 1. Meschanov G.I. Rarvitie proizvodstva novih tipov poszarobezopasnih kabeley v Rossiy Kabely i provoda. – 2007. – № 4. – С. 5-9. 2. Bayer. G. Nanokompozity kak ognезaschitnaya sistema Kabely i provoda. – 2013. – № 5. – С. 60-64. 3. Izolyovany provody ta kadel'y. Vimogi do poszheshzhnoy bespeky. DSTU 4809:2007. – К.: 2007. – 14.

Надійшла (received) 10.02.2014

УДК 621.315

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

В.В.ЗОЛОТАРЕВ, канд. техн. наук, директор по внешнеэкон. связям, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;

С.В.БУЗЬКО, канд. техн. наук, вед. специалист, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;

Т.Ю.АНТОНЕЦ, инженер, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;

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

ВЛИЯНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ЭКРАНОВ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В КАБЕЛЯХ

Выведена зависимость диэлектрических потерь от проводимости экранов в силовых кабелях. Типовой конструкцией современных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена является коаксиальная конструкция типа «проводящий экран из полимера - изоляция из сшитого полиэтилена, второй - проводящий экран из полимера». Установлена зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от проводимости.

Ключевые слова: силовой кабель, изоляция, диэлектрические потери.

Введение. Основной в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена является коаксиальная конструкция. В ней на уплотненную токопроводящую жилу методом экструзии с помощью строенной экструзионной головки одновременно накладываются экран по жиле из полупроводящего полиэтилена, собственно изоляционный слой из высококачественного изоляционного полиэтилена, а также экран по изоляции из полупроводящего полиэтилена. Причем проводимости экрана по жиле и экрана по изоляции могут отличаться.

© В.М.Золотарев, В.В.Золотарев, С.В.Бузько, Т.Ю.Антонец, А.А.Науменко, 2014

ся друг от друга. Таким образом, получается многослойная конструкция сердечника кабеля, в которой полупроводящие слои имеют существенно большую проводимость, чем изоляционный слой полиэтилена.

В [1] электромагнитные процессы в такого рода конструкциях сшитой полиэтиленовой изоляции кабеля рассмотрены с учетом только тока смещения и тока проводимости. При удельной проводимости сшитого полиэтилена порядка 10^{-14} Ом·м, его относительной проницаемости 2,3 и угловой частоте 314 с^{-1} (что соответствует промышленной частоте приложенного напряжения), теоретическое значение тангенса угла диэлектрических потерь оказывается равным $1,56 \cdot 10^{-6}$. Однако измерения на реальных образцах кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена дают значительно большее значение тангенса угла диэлектрических потерь порядка $10^{-3} \dots 10^{-4}$. Таким образом, учет только сквозного тока проводимости через изоляцию дает заниженное значение тангенса угла диэлектрических потерь примерно на два порядка.

Задачей настоящей работы является более полный учет токов в сшитой полиэтиленовой изоляции, влияющих на тангенс угла диэлектрических потерь.

К этим токам относятся:

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

Решение задачи. Если объединить ток проводимости и суммарный ток поляризации, учитывающий также ионизационные процессы, то проводимость неидеального диэлектрика γ можно выразить через активную проводимость γ' и угол поляризации α так

$$\gamma = \gamma' + \omega \varepsilon \sin \alpha.$$

Тогда теоретическое значение тангенса угла диэлектрических потерь для трехслойной изоляционной конструкции будет равно

$$\begin{aligned}
 \operatorname{tg} \delta = & \frac{[(\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2) \gamma_3 - \omega^2 (\varepsilon_1 \gamma_2 + \varepsilon_2 \gamma_1) \varepsilon_3]}{[(\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2) \gamma_3 - \omega^2 (\varepsilon_1 \gamma_2 + \varepsilon_2 \gamma_1) \varepsilon_3]} \times \\
 \times & \frac{[(\gamma_2 \gamma_3 - \omega^2 \varepsilon_2 \varepsilon_3) \alpha_1 + (\gamma_1 \gamma_3 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_3) \alpha_2 + (\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2) \alpha_3] +}{\cdot (-\omega) [(\varepsilon_3 \gamma_2 + \varepsilon_2 \gamma_3) \alpha_1 + (\varepsilon_3 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_3) \alpha_2 + (\varepsilon_2 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_2) \alpha_3] +} \times \\
 & \times \frac{+\omega^2 [\gamma_3 (\varepsilon_2 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_2) + \varepsilon_3 (\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2)]}{+\omega [\gamma_3 (\varepsilon_2 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_2) + \varepsilon_3 (\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2)]} \times \\
 \times & \frac{\cdot [(\varepsilon_3 \gamma_2 + \varepsilon_2 \gamma_3) \alpha_1 + (\varepsilon_3 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_3) \alpha_2 + (\varepsilon_2 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_2) \alpha_3]}{\cdot [(\gamma_2 \gamma_3 - \omega^2 \varepsilon_2 \varepsilon_3) \alpha_1 + (\gamma_1 \gamma_3 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_3) \alpha_2 + (\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2) \alpha_3]} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Последнее выражение получено с учетом тока проводимости, тока смещения и тока поляризации, учитываемого в предпоследнем выражении дополнительным членом для проводимости неидеального диэлектрика. Оно содержит все необходимые активные проводимости и диэлектрические проницаемости во всех трех слоях γ_k, ε_k , а также коэффициенты α_k , зависящие от размеров рассматриваемой изоляционной конструкции ($k = 3$).

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

Как показывает анализ, при неизменных параметрах собственно изоляционного слоя $\varepsilon_2 = 2,3 \cdot \varepsilon_0, \gamma_2 = 10^{-15}$, тангенс угла диэлектрических потерь согласно (1) имеет максимум (рис. 1). Такой же максимум для $\text{tg } \delta$ наблюдается и в двухслойной конструкции «полупроводящий экран по жиле – изоляция».

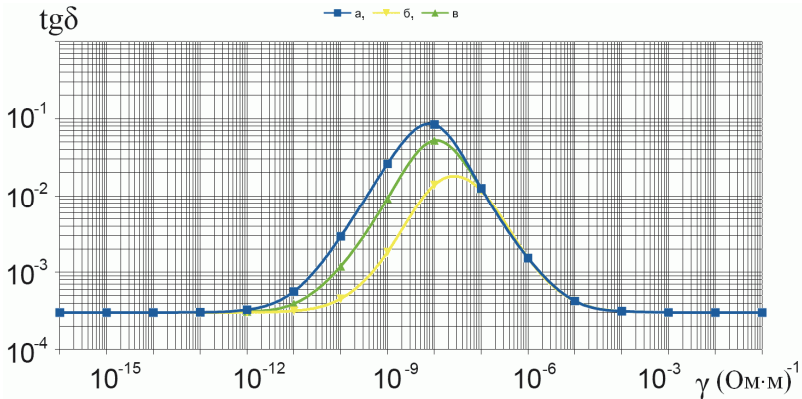


Рисунок 1 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от проводимости экранов по жиле γ_1 и по изоляции γ_3 в трехслойной конструкции «полупроводящий экран по жиле – изоляция сшитого полиэтилена – полупроводящий экран по изоляции» (радиус по жиле $r_0 = 13,2$ мм, толщина экрана по жиле и по изоляции, соответственно, 1,4 мм и 2 мм, радиус экрана по жиле 14,6 мм, толщина изоляции 16 мм, радиус по изоляции – 30,6 мм, радиус экрана по изоляции с учетом проложенной по нему полупроводящей ленты толщиной 0,4 мм составляет 32 мм); $\gamma_1 = \gamma_3 = \gamma, \gamma_2 = 10^{-15} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$; $a - \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 2,3 \varepsilon_0$; $b - \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 10 \varepsilon_0$; $v - \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 4 \varepsilon_0$

Наличие максимума на кривой $\text{tg } \delta$ можно объяснить следующим образом. Если γ_1 и γ_3 неограниченно уменьшать, то свойства полупроводящих экранов будут стремиться к свойствам высококачественного полиэтилена с низким значением $\text{tg } \delta$. При неограниченном увеличении γ_1 и γ_2 , свойства полупроводящих экранов будут стремиться к свойствам хорошего проводника,

то есть к свойствам материала токопроводящей жилы и проводящего металлического экрана, между которыми будет находиться слой высококачественного полиэтилена с низким значением $\operatorname{tg} \delta$. Так как значение $\operatorname{tg} \delta$ не зависит от объема диэлектрика, то при средних значениях проводимости полупроводящих экранов γ_1 и γ_3 будет наблюдаться максимум тангенса угла диэлектрических потерь для трехслойной конструкции с двумя проводящими экранами. Эти же рассуждения будут справедливыми и для случая конструкции с одним полупроводящим экраном. Проведенное исследование показало, что при выборе проводимости полупроводящих экранов по жиле и по изоляции необходимо учитывать следующее.

Сглаживание электрического поля на макро- и микровыступах проводящих электродов (то есть на поверхностях токопроводящей жилы и медного экрана) происходит при толщине полупроводящих экранов по жиле и изоляции не менее 1 мм и их проводимости γ_1, γ_3 , не менее $10^{-6} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ при 20°C .

При достижении длительно допустимых токов в режиме перегрузки температура кабеля может достигать 130°C . При этом проводимость материала полупроводящих экранов может измениться на три порядка от 10^{-3} до $10^{-6} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$. Таким образом для того, чтобы полупроводящие экраны не потеряли своего главного назначения по выравниванию электрического поля на макро- и микровыступах проводящих электродов, следует выбирать электропроводность полупроводящих экранов γ_1, γ_3 не менее $10^{-3} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$, что соответствует их объемному удельному сопротивлению 1000 Ом·м. Отсюда можно сделать вывод, что для нормальной работы кабелей СВН, для которых $\operatorname{tg} \delta$ нормируется и не должен превышать значения 10^{-3} следует выбирать значения проводимости проводящих пластмассовых экранов не менее $10^{-3} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$.

Для того, чтобы определить тангенс угла диэлектрических потерь по трехслойной сшитой изоляционной конструкции «полупроводящий экран по жиле – изоляция из сшитого полиэтилена – полупроводящий экран по изоляции с учетом токов смещения, проводимости и поляризации необходимо учитывать полную проводимость для всех трех слоев. В слоях 1, 3 (то есть в полупроводящем экране по жиле и в полупроводящем экране по изоляции) значения проводимости γ , при ее изменении по крайней мере до величины 10^{-11} , можно принять равным значению активной проводимости γ' . А в изоляционном слое сшитого полиэтилена (то есть в слое 2) имеем

$$\gamma_2 = \gamma'_2 + \omega \varepsilon \sin \alpha_2.$$

Однако угол поляризации α не известен. Эту трудность можно обойти следующим образом. Учитывая, что $\sin \alpha$ мало отличается от $\operatorname{tg} \alpha$, а тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ в изоляционном слое сшитого полиэтилена определяется не токами проводимости, а в основном токами поляризации, можно принять тангенс угла поляризации примерно равным тангенсу угла диэлектрических потерь

$$\sin \alpha_2 \approx \operatorname{tg} \alpha_2 \approx \operatorname{tg} \delta_2.$$

Для определения тангенса угла диэлектрических потерь чистого поли-

этилена (то есть без примеси углерода) можно воспользоваться, например, результатами теоретических исследований, проведенных в работе [2].

В этой работе путем решения полевой задачи определялась комплексная диэлектрическая проницаемость сшитого полиэтилена без проводящих примесей $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$. Так, при нормальных условиях, на частоте около 50 Гц было получено значение $\varepsilon = 2,25 - i \cdot 0,0009$, что дает значение тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta \approx \varepsilon''/\varepsilon' \approx 4 \cdot 10^{-4}$.

Второй трудностью при определении тангенса угла диэлектрических потерь трехслойной сшитой конструкции является то, что не известна зависимость диэлектрической проницаемости материала полупроводящих экранов по жиле и изоляции от их проводимости, которая определяется содержанием углерода в них. Однако известно, что повышение содержания проводящих примесей в изоляционных средах ведет к увеличению их диэлектрической проницаемости. Влияние диэлектрической проницаемости полупроводящих экранов на тангенс угла диэлектрических потерь трехслойной сшитой конструкции можно приблизительно установить путем численного эксперимента, увеличивая ее значение при остальных неизменных параметрах. Из рис. 1 видно, что даже существенное увеличение диэлектрической проницаемости полупроводящих экранов с 2,3 до 10 качественно не влияет на зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от проводимости полупроводящих экранов.

Выводы. При значении проводимости полупроводящих экранов примерно равной $10^{-8} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ значение тангенса диэлектрических потерь в кабеле с трехслойной сшитой изоляционной конструкцией может достигать значения около 0,1, что на два порядка выше предельно допустимого значения, равного 0,001. С увеличением температуры кабеля активная проводимость полупроводящих экранов падает. Эту проводимость выбирают так, чтобы ее значение лежало правее максимума и находилось на горизонтальном участке кривой (рис. 1). Исходя из этого, активную проводимость экранов выбирают с большим запасом, так, что на практике ее значение составляет примерно $0,1 (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$.

Список литературы: 1. Золотарьов В.В. Пристрої електричних випробувань і контролю параметрів кабелів і проводів з ізоляцією із зшитого поліетилену: Дис...канд. техн. наук. – К.: 2011. – 194 с. 2. J.Yang, R.Huang, D.Zhang. A Field – circuit coupled method to accurately determine intrinsic complex permittivity of XLPE insulation material // IEEE Transaction on dielectrics and electrical insulation. – 2008. – Vol. 15, № 2. – PP. 334 – 341.

Bibliography (transliterated): 1. Zolotaryov V.V. Pritroei elektrichnich viprobuvan kabeliv. Dis. k.t.n. – K.: 2011. – 194. 2. J.Yang, R.Huang, D.Zhang. A Field – circuit coupled method to accurately determine intrinsic complex permittivity of XLPE insulation material // IEEE Transaction on dielectrics and electrical insulation. – 2008. – Vol. 15, № 2. – 334 – 341.

Надійшла (received) 14.03.2014

В. М. ИВАНОВ, зав.отделом, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

ТРАНСФОРМАТОР С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПЛЕНИЕМ ЭНЕРГИИ

Рассмотрена схема импульсного трансформатора используемого в качестве индуктивного накопителя энергии. Проанализирован режим работы трансформатора, рассчитаны параметры импульса напряжения на нагрузке, к.п.д. запасаения энергии.

Ключевые слова: индуктивный накопитель энергии, импульсный трансформатор, форма импульса, импульс высокого напряжения.

Введение. В последнее время в народном хозяйстве все больше используются высоковольтные импульсные технологии. Так в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» созданы установки в которых высоковольтные импульсные технологии используются для обработки пищевых продуктов, обработки сточных вод и вредных газовых выбросов промышленных предприятий, для получения озона [1]. Данные технологии не возможны без применения генераторов импульсов высокого напряжения. Одним из основных элементов таких генераторов является трансформатор. Индуктивные накопители многократно превосходят емкостные накопители по запасаемой удельной энергии, что резко уменьшает их сравнительные габариты, вес и стоимость. Для получения высоковольтных импульсов с помощью индуктивных накопителей энергии не нужны источники питания высоких напряжений.

Целью данной работы является обоснование преимуществ работы импульсных трансформаторов (ИТ) как ключевого элемента высоковольтных источников питания в технологических установках в качестве индуктивного накопителя энергии.

Работа трансформатора с индуктивным накопителем энергии происходит следующим образом: при подаче импульса управления на коммутирующий элемент происходит его открывание и протекание нарастающего тока через первичную обмотку ИТ от источника напряжения. При быстром закрытии коммутирующего ключа на индуктивном элементе происходит резкое (быстрое) нарастание напряжения. В результате чего на вторичной обмотке ИТ формируется импульс высокого напряжения.

Упрощенная электрическая схема трансформатора с индуктивным накоплением показана на рис. 1, где L_3 – накопительная индуктивность, R_3 – сопротивление, учитывающее сопротивление коммутирующего ключа и потери в катушке L_3 ; E – источник напряжения.

Ток, протекающий через индуктивность L_3 , медленно изменяется по за-

кону

$$i_3 = \frac{E}{R_3} (1 - e^{-t/T_3}), \quad (1)$$

где $T_3 = L_3/R_3$ – постоянная времени заряда.

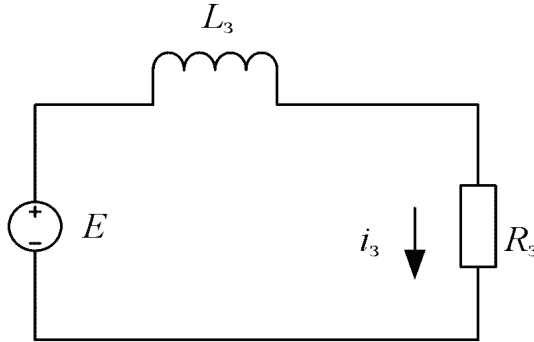


Рисунок 1 – Упрощенная электрическая схема трансформатора с индуктивным накоплением

С увеличением сопротивления R_3 , сила тока медленнее достигает установившегося значения E/R_3 . При малом значении R_3 ток i_3 в течение времени $t \ll T_3$ определяется

$$i_3 \cong \frac{E}{L_3} t. \quad (2)$$

При $t < 0,5 T_3$ погрешность использования формулы не превышает 10 %.

При протекании тока i_3 в индуктивности L_3 в ней запасается энергия $L_3 i_3^2/2$. При достижении нужного значения энергии ключ разрывается и в катушке индуцируется э.д.с. e , имеющая значительно большее напряжение чем напряжение источника. Запасенная энергия выделяется в нагрузку, создавая на ней импульс высокого напряжения.

Энергия W_1 , запасаемая в индуктивности L_3 ,

$$W_1 = \frac{1}{2} L_3 I_3^2 = \frac{1}{2} L_3 \frac{E^2}{R_3^2} (1 - e^{-\tau_3})^2, \quad (3)$$

где $\tau_3 = t_3/T_3$ – отношение длительности времени запасаения энергии к постоянной времени заряда.

Энергия W_2 , выделяемая в сопротивлении:

$$W_2 = \int_0^{\tau_3} R_3 I_3^2 dt = \int_0^{\tau_3} \frac{E^2}{R_3} (1 - e^{-t/T_3})^2 dt = T_3 \frac{E^2}{R_3} \left(\tau_3 - \frac{3}{2} + 2e^{-\tau_3} - \frac{1}{2} e^{-2\tau_3} \right), \quad (4)$$

Полная энергия

$$W_1 + W_2 = T_3 \frac{E^2}{R_3} (\tau_3 - 1 + e^{-\tau_3}). \quad (5)$$

Коэффициент полезного действия запасаения энергии

$$\eta_3 = \frac{W_1}{W_1 + W_2} = \frac{1}{2} \frac{1 - 2e^{-\tau_3} + e^{-2\tau_3}}{\tau_3 - 1 + e^{-\tau_3}} \quad (6)$$

зависит только от $\tau_3 = t_3/T_3$.

При длительном времени протекания тока заряда, то есть $\tau_3 \rightarrow \infty$, $\eta_3 = 0$, так как через время $t = 3T_3$ энергия, которая запасается, достигает максимального значения $L_3 E^2 / (2R_3^2)$ и дальнейшее протекание тока, создает только потери сопротивлению R_3 . При $\tau_3 \rightarrow 0$ к.п.д. является наибольшим.

Для времени $\tau_3 \ll T_3$ из разложения выражения (6) в ряд следует:

$$\eta_3 \cong \frac{1 - \tau_3}{1 - \frac{1}{3}\tau_3} \cong 1 - \frac{2}{3}\tau_3. \quad (7)$$

График зависимости к.п.д. от отношения длительности времени запасаения энергии к постоянной времени заряда представлен на рис. 2.

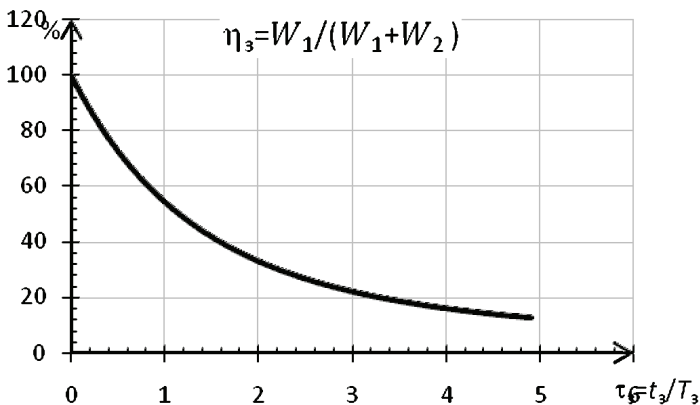


Рисунок 2 – Зависимость к.п.д. запасаения энергии от отношения длительности времени запасаения энергии к постоянной времени заряда

Из графика видно, что при времени заряда t , индуктивного накопителя равном $3T_3$, к.п.д. запасаения энергии очень мал и составляет примерно 25 %. Более выгодным является режим заряда с малой длительностью времени заряда t_3 ($\approx 0,2 T_3$), что составляет примерно 87 %. При этом зарядной ток составляет $i_3 \cong \frac{E}{L_3} t_3 = \frac{E}{L_3} 0,2T_3 = 0,2 \frac{E}{R_3}$, 20 % максимального значения, а запасенная энергия только 5% максимального значения.

Целесообразно применять такой режим работы для устройств в которых важным является получение импульса высокого напряжения, а энергетические характеристики являются второстепенными. Также целесообразно применять режим заряда близким к максимальному. При времени заряда t_3 близ-

ком к времени T_3 зарядный ток составляет $\approx 63\%$, при этом к.п.д. 54% .

Для установок с емкостным накопителем, к.п.д. запасаения энергии растет с увеличением запасаемой энергии, а в установках с индуктивным накопителем – наоборот.

В данном варианте использования трансформатора с индуктивным накопителем энергии на нагрузке формируется импульс напряжения превосходящий исходное напряжение источника питания от 5 до ~ 15 раз. При использовании трансформатора с емкостным накопителем величина импульса напряжения не превышает исходное напряжение на накопительном конденсаторе с учетом коэффициента трансформации, а иногда составляет только половину этого напряжения.

Эквивалентная схема разрядной цепи трансформатора с индуктивным накоплением энергии представлена на рис. 3. Проектирование и расчет импульсных трансформаторов подробно описан в [2]. Рассчитаем параметры импульса для трансформатора с индуктивным накоплением энергии.

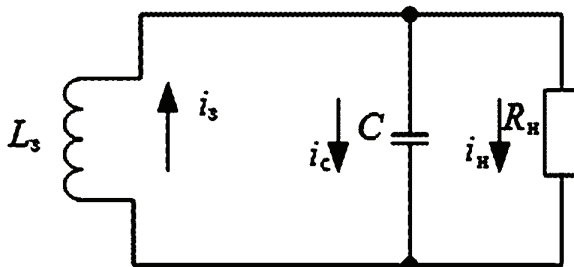


Рисунок 3 – Упрощенная эквивалентная схема разрядной цепи

Для быстрых процессов, протекающих в рассматриваемой цепи, накопительную индуктивность L_3 можно считать равной бесконечно большой величине. Объединим паразитные емкости обмотки C_L и емкость нагрузки C_H в одну эквивалентную емкость $C = C_L + C_H$ (рис. 3).

Пусть в момент $t = 0$ записания ключа величина тока, протекавшего через индуктивность $L_3(0)$ равна $i_3 = I_{ам}$.

Протекающий через индуктивность ток, не может измениться мгновенно, значит в первый момент после размыкания ключа, ток I_3 потечет через емкость C . При отсутствии емкости на сопротивлении нагрузки напряжение возросло бы до максимального значения $U_{нм} = I_{ам} R_H$. Из-за наличия емкости C фронт импульса напряжения имеет конечную крутизну. Максимально возможный коэффициент трансформации напряжения импульса будет для случая, когда емкость $C = 0$

$$k_{\gamma} = \frac{U_{нм}}{E} = \frac{I_{ам} R_H}{E}, \quad (8)$$

Составим операторные уравнения для процессов в импульсной цепи при условии, что $u_L \gg u_{сн}$:

$$i_3 = i_H + i_C = \frac{\overline{u_H}}{R_H} + pC\overline{u_H}. \quad (9)$$

$$\overline{u_L} + \overline{u_H} = 0; \overline{u_L} = pL_3(i_3 - i_3(0)) = pL_3\left(\frac{\overline{u_H}}{R_H} + pC\overline{u_H} - I_{am}\right). \quad (10)$$

Отсюда:

$$\overline{u_H} = \frac{I_{am}}{C} \frac{p}{p^2 + 2ap + \omega_0^2} = \frac{M(p)}{N(p)}. \quad (11)$$

где $2a = 1/(R_H C)$; $\omega_0^2 = 1/(L_3 C)$.

Воспользовавшись теоремой разложения, получим:

$$u_H(t) = u_H = \frac{I_{am}}{C} \left(\frac{e^{p_1 t}}{2(p_1 + a)} + \frac{e^{p_2 t}}{2(p_2 + a)} \right), \quad (12)$$

где p_1, p_2 корни характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -a \pm \sqrt{a^2 - \omega_0^2}.$$

Для большинства случаев емкость настолько мала, что постоянная вре-

мени $T_L = \frac{L_3}{R_H} \gg 2R_H C = 2T_C$

При $a > 2\omega_0$ можно принять:

$$p_1 = -a + \sqrt{a^2 - \omega_0^2} \cong -a + \left(a - \frac{\omega_0^2}{2a}\right) = -\frac{R_H}{L_3} = -\frac{1}{T_L}; \quad (13)$$

$$p_2 = -a - \sqrt{a^2 - \omega_0^2} \cong -2a = -\frac{1}{R_H C} = -\frac{1}{T_C}; \quad (14)$$

$$p_{1,2} + a = \pm \sqrt{a^2 - \omega_0^2} \cong \pm 2a = \pm \frac{1}{R_H C}. \quad (15)$$

С учетом этих значений получим:

$$u_H = I_{am} R_H (e^{-t/T_L} - e^{-t/T_C}) = u_{H1} - u_{H2}, \quad (16)$$

Следовательно форма импульса напряжения на нагрузке определяется разностью двух экспонент. Из которых первая экспонента определяет длительность t_H импульса, а вторая определяет длительность t_ϕ фронта импульса. Приближенно амплитуду импульса напряжения, длительности фронта и импульса можно оценить простыми формулами:

$$U_{Hm} \cong 0,9 I_{am} R_H; \quad t_\phi \cong 3R_H C; \quad t_H \cong 3L_3/R_H. \quad (17)$$

Вывод. Целесообразно применять такой режим работы для устройств в которых важным является получение импульса высокого напряжения, а энергетические характеристики являются второстепенными. Также целесообразно применять режим заряда близким к максимальному. Получены простые формулы для параметров генерируемого импульса.

Список литературы: 1. Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. Генераторы высоковольтных импульсов с частотой следования до 50000 импульсов в секунду // Приборы и

техника експеримента (г. Москва). – 2011. – № 4. – С. 92-101. 2. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов / Вдовин С. С. – Л.: Энергия, 1971.

Bibliography (transliterated): 1. Bojko N.I., Borcov A.V., Evdoshenko L.S., Ivano vV.M. Generatory vysokovol'nyh impul'sov schastotoj sledovanija do 50000 impul'sovvsekindu Pribory i tehnika jeksperimenta (g.Moskva). – 2011. – №4. – 92-101. 2. Vdovin S. S. Proektirovani eimpul'snyh transformatorov Vdovin S. S. L. :Jenergija, 1971.

Надійшла (received) 03.04.2014

УДК 004.912

О.В. КАСІЛОВ, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ»
А.В. СУБОТІНА, магістр, НТУ «ХПІ»

СИСТЕМА ПІДГОТОВКИ БІБЛІОГРАФІЧНИХ ОПИСІВ ЗГІДНО МІЖНАРОДНИМ СТАНДАРТАМ

Система підготовки бібліографічних описів згідно міжнародним стандартам призначена для створення бібліографічних описів в APA, MLA, Гарвардському стилях оформлення, розроблені принципи складання та алгоритм перетворення бібліографічних описів з ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 до міжнародних стандартів на прикладі книг та статей у журналах. Досліджено структури бібліографічних описів різних стандартів. Призначена для використання авторами наукових робіт (студентами, аспірантами, викладачами) або будь-якими іншими особами, які займаються аналітико-синтетичною переробкою інформації.

Ключові слова: система підготовки, бібліографічний опис, міжнародний стандарт, APA, MLA, Гарвардський стиль, ДСТУ ГОСТ 7.1:2006.

Вступ. Останнім часом зростає необхідність в описі джерел інформації, згідно з міжнародними стандартами. Це потрібно для оформлення списків публікацій, які використовуються при написанні академічних робіт, наукових статей і т.п. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні системи підготовки бібліографічних описів для роботи з міжнародними стандартами, яка сприяє підвищенню продуктивності бібліотечних комп'ютерних систем та економії часу авторів наукових робіт, що є найважливішим фактором в даний час.

Постановка задачі. Програмне забезпечення для роботи з бібліографічною інформацією, наприклад, Bibloscape, BiblioExpress, HotReference, Zotero, БиблиоМастер, EndNote [1], RefWorks, Mendeley та інші, відносяться до систем управління бібліографічною інформацією. Ці програми дозволяють ав-

© О.В. Касілов, А.В. Суботіна., 2014

томатизувати деякі функції по створенню каталогів публікацій різних видів і пошуку інформації в спеціалізованих БД та інше. За їх допомогою можна створити посилання, цитати та багато іншого, але вони не мають можливості складання бібліографічних описів за міжнародними стандартами та тим більш автоматичного перетворення бібліографічних описів, оформлених згідно діючого стандарту ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 до міжнародних стандартів. У нових версіях Microsoft Word [2] можна автоматично створити списки літератури, але на основі джерел інформації, використаних при складанні документу. Згідно до виконаного огляду, на сьогоднішній день в Україні немає таких систем підготовки бібліографічних описів, які повністю б задовольнили потреби користувача. Таким чином, **мета статті** полягає у дослідженні структури бібліографічних описів різних міжнародних стандартів та подальшому визначенні принципів роботи системи підготовки бібліографічних описів.

Матеріали досліджень. Бібліографічні описи у списку використаної літератури оформлюються відповідно зі стандартизованими вимогами оформлення на тій чи іншій мові. У світовій практиці найбільш використовуваними є APA, MLA, Гарвардський, Чиказький стилі та інші [3].

Виходячи з важливості адаптації змісту видання з метою включення його до міжнародних реферативних баз даних, а також, враховуючи технічні особливості роботи даних систем, додатково по тексту рукописів повинні бути вказані посилання на використану літературу в найбільш поширеному міжнародному форматі. На основі вимог періодичного видання та його тематичного спрямування, стандарти оформлення посилань можуть бути різними.

В якості базового стандарту для виконання транслітерації обрана система, прийнята Комісією з географічних назв США (у 1944 році) та Постійним комітетом з географічних назв Великобританії (у 1947 році) для передачі географічних назв (BGN / PCGN). На сьогоднішній день дана система, по суті, є стандартом сформованої практики передачі слов'янських імен і назв, зрозуміла інакомовному населенню. У стандарті не використовується діакритика або незвичайні символи.

В якості прикладу порівняння використання стандартів візьмемо бібліографічні описи книг та статей у журналах (табл. 1).

На рис. 1 представлені структури бібліографічного опису книги та статті у журнал за міжнародними стандартами APA, MLA та Гарвардським стилем оформлення.

Далі описані дії, направлені на перетворення бібліографічного опису, складеного за ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 до міжнародних стандартів.

Згідно до оформлення бібліографічного опису за стандартом ДСТУ ГОСТ 7.1:2006, він включає до свого складу бібліографічні відомості про документи, які повинні бути наведені за певними правилами. При цьому встановлюється наповнення та порядок проходження областей та елементів призначених для ідентифікації і загальної характеристики документа.

Таблиця 1 – Елементи та приклади бібліографічних описів книг та статей у журналах

Стиль APA [4]
Елементи автор(и) або редактор(и), дата публікації, заголовок, місце видання, видавництво.
Бібліографічний опис книг Kidder, T. (1981). <i>The soul of a new machine</i> . Boston, MA: Little, Brown & Company.
Бібліографічний опис статті у журналі Ku, G. (2008). Learning to de-escalate: The effects of regret in escalation of commitment. <i>Organizational Behavior and Human Decision Processes</i> , 105(2), 221-232.
Стиль MLA [5]
Елементи в описі книги Прізвище, Ім'я. Заголовок книги. Місце публікації: Видавництво, Рік публікації. Стан публікації.
Бібліографічний опис книг Nabokov, Vladimir. <i>Lolita</i> . New York: Putnam, 1955. Print.
Елементи в описі статті у журналі автор(и), заголовок статті, назва публікації, номер тому, дата публікації (скорочення місяців, якщо вони використовуються), кількість сторінок та номер сторінки, стан публікації
Бібліографічний опис статті у журналі Matarrita-Cascante, David. "Beyond Growth: Reaching Tourism-Led Development". <i>Annals of Tourism Research</i> 37.4 (2010): 1141-63. Print.
Гарвардський стиль оформлення (BSI) [3, 6]
Елементи автор/и, редактори, перекладачі та ін. (прізвище кома ініціали) Рік видання, Заголовок. Відомості про видання (інформація про перевидання, номер видання, серія), Видавництво, Місце видання, Об'єм. При оформленні україно- чи російськомовного джерела на іншій мові після Заголовку та Відомостей про видання (перекладених на іншу мову) у [квадратних дужках] вказується транслітерування Заголовку разом із Відомостями про видання на англійську мову.
Бібліографічний опис книг Porter, M. (2008), <i>Competitive strategy: methodology for analyzing industries and competitors</i> . Trans. from Eng. 3rd ed. [Konkurentnaya strategiya: metodika analiza otraslei i konkurentov. Per. s angl. 3-e izd.], Al'pina Biznes Buks, Moscow, 453 p.
Елементи в описі статті у журналі автор/и (прізвище кома ініціали) Рік видання, "Заголовок статті: відомості, які відносяться до заголовку", Назва журналу, Номер випуску, Місцезнаходження статті (сторінки).
Бібліографічний опис статті у журналі Timoshenko, V.S. (2010), "The issues of the law state development" ["Problemy postroeniya pravovogo gosudarstva"], <i>Veche</i> , No. 18, pp. 12-13.

За діючим стандартом ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 *заголовок бібліографічного опису має вигляд* (з врахуванням вживання великої та малої літер) [7]:

Основна назва [*Засальне позначення матеріалу*] = *Паралельна назва : відомості, які відносяться до назви / відомості про Авторство чи Відповідаль-*

ність ; про інших Осіб. – Відомості про повторність видання / Відповідальність за видання. – *Зона специфічних відомостей*. – Місце видання : Вид-во, рік. – Фізична (кількісна) характеристика. – (Серія і підсерія ; №, т.). – *Примітки (додаткова інформація від бібліографа, напр.: системні вимоги до електрон. ресурсів)*. – ISBN.

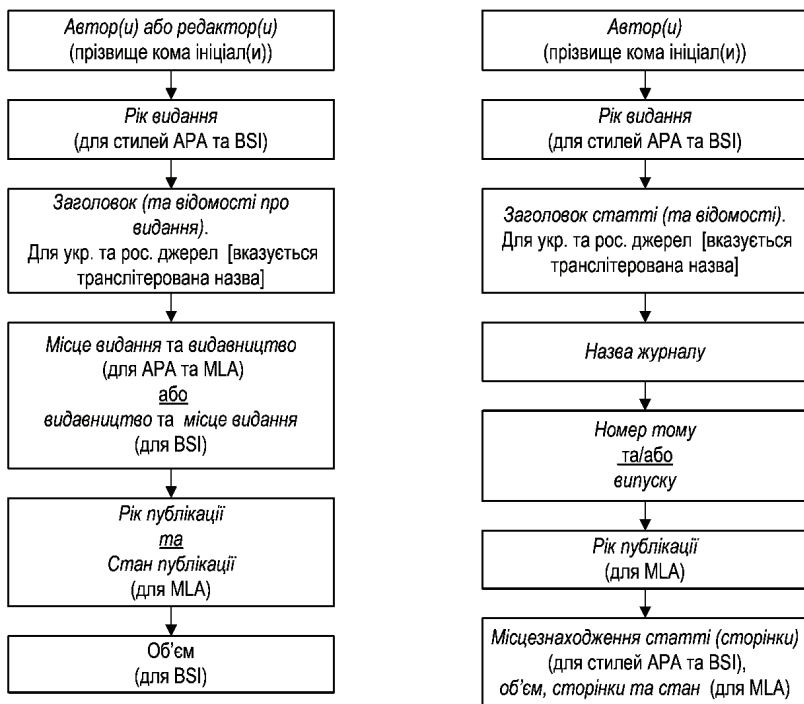


Рисунок 1 – Структура бібліографічного опису відповідно книги та статті у журнал за міжнародними стандартами

Позначимо структурні елементи бібліографічного опису наступним чином [8]:

$$d_i < M_{i1}, M_{i2}, M_{i3}, M_{i4}, M_{i5}, M_{i6}, M_{i7}, M_{i8} >$$

де d_i – бібліографічний опис; M_{i1} – область заголовка і відомостей про відповідальність; M_{i2} – область видання; M_{i3} – область специфічних відомостей; M_{i4} – область вихідних даних; M_{i5} – область фізичної характеристики; M_{i6} – область серії; M_{i7} – область приміток; M_{i8} – область стандартного номеру (або його альтернативи) та умов доступності.

Порядок перетворення бібліографічного опису:

1) визначитись, до якого міжнародного стандарту необхідно конвертувати бібліографічний опис;

2) виявити та відокремити складові частини в описі, оформленому згідно стандарту ДСТУ ГОСТ 7.1:2006;

3) зіставити описи у цих двох форматах, визначити області;

4) переставити їх або поміняти місцями;

5) розставити знаки пунктуації згідно потрібному стандарту;

6) перекласти та/або транслітерувати необхідні області.

Для автоматизації процесу транслітерації рекомендується використання широко поширених онлайн-сервісів [9].

Транслітерації підлягають прізвища та ініціали авторів, назви публікацій, періодичних видань та ін. Місце видання та видавництва зазначається відповідно до офіційних аналогів в англійській мові. Виконання транслітерації необхідно тільки при відсутності достовірних відомостей про офіційні найменування видавництва та організацій, в яких опубліковано цей матеріал.

У табл.2 описані існуючі online-сервіси для роботи зі складанням бібліографічних описів [10].

Після детального вивчення вище перелічених сервісів, можна зробити висновок, що усі вони працюють безпосередньо на англійській мові та відповідно складають описи англомовних джерел, не дозволяють отримати необхідну інформацію, якщо вихідні джерела написані на українській або російській мовах (мова оригіналу).

Таблиця 2 – Online-сервіси для роботи зі складанням бібліографічних описів

Назва	Адреса	Опис
CiteThisForMe	citethisforme.com/cite/book/autocite	APA, MLA, Гарвардський стиль
Neil's Toolbox	neilstoolbox.com/bibliography-creator/	Гарвардський стиль, MLA
Calvin	calvin.edu/library/knightcite/	MLA
Harvard Generator	harvardgenerator.com	Гарвардський стиль
Citation Machine	http://citationmachine.net/	MLA 7 th ed, APA 6 th ed, Turabian, Chicago.
Wikindx	http://wikindx.sourceforge.net/	APA, Chicago, IEEE
EasyBib	easybib.com/cite/form/website	MLA 6, MLA 7, APA, Chicago/Turabian

Висновки. Дослідження структури даних бібліографічних описів згідно ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 та міжнародними стандартами дозволило розробити принципи та алгоритм перетворення до різних стилів.

За результатами роботи планується розробка програмного продукту, який спрощує роботу з перетворення посилань на джерела інформації, згідно зі стандартами APA, MLA та Гарвардським стилем оформлення.

Список літератури: 1. Касілов О. В., Суботіна А. В. Технологія перетворення бібліографічних описів [Текст] / О. В. Касілов, А. В. Суботіна // Східно-Європейський журнал передових технологій. Прикладні інформаційні технології. – Х.: 2013. – № 3/2 (63). – С. 42–45. 2. Автоматичне

форматування переліків літератури за допомогою стилів APA, MLA, Chicago [Електронний ресурс] / [Автори сайту]. Офіційний сайт Microsoft Office. – Електрон. дан. – Режим доступу : <http://office.microsoft.com/ru-ru/word-help/HA102435469.aspx>. – Загл. з титул. екрану (прогл. 13 березня 2014 року). 3. Видавництво «Аналітика Родіс». Російські наукові рецензовані журнали. Офіційний сайт видавництва. Міжнародні стандарти оформлення бібліографії [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://publishing-vak.ru/bibliography-international.htm>. – Загл. з титул. екрану (прогл. 13 березня 2014 року). 4. Cornell University Library. APA Citation Style [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://www.library.cornell.edu/resrch/citmanage/apa>. – Загл. з титул. екрану (прогл. 13 березня 2014 року). 5. Cornell University Library. MLA Citation Style [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://www.library.cornell.edu/resrch/citmanage/mla#online>. – Загл. з титул. екрану (прогл. 13 березня 2014 року). 6. Emerald Group Publishing. How to... use the Harvard reference system [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://www.emeraldgroupublishing.com/authors/guides/write/harvard.htm?part=2>. – Загл. з титул. екрану (прогл. 13 березня 2014 року). 7. ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. Бібліографічний запис, бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання : метод. рекомендації з впровадження [Текст] / уклали: Галевич О. К., Штогрин І. М. – Львів, 2008. – 20 с. 8. Касилов О. В., Субботина А. В. Технологія преобразовання бібліографічних описаний [Текст] / О. В. Касилов, А. В. Субботина // 23-я Міжнародна Кримська конференція «СВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» (КрыМиКо'2013). Севастополь, 8–13 сентября 2013 г. : матеріали конф. в 2 т., том 1, Н.9р – Севастополь : Вебер, 2013. – С. 44-45. – ISBN 978-966-335-399-9. 9. Требования к содержанию и оформлению рукописей научных статей : научн.-практ. журнал «Экономика промышленности». / осн. НАН Украины Институт экономики промышленности. – Донецк, 2012. – с. 14-17. 10. Web in Learning. Как оформить список литературы для зарубежного журнала [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://web-in-learning.blogspot.com/2012/12/blog-post.html>. – Загл. з титул. екрану (прогл. 13 березня 2014 року).

Bibliography (transliterated): 1. Kasilov O. V., Subotina A. V. Tekhnologiya peretvorenyya bibliografichnykh opisyv [Tekst] O. V. Kasilov, A. V. Subotina Skhidno-Yevropeys'kyy zhurnal pere-dovykh tekhnolohiy. Pryingkladni informatsiyni tekhnolohiyi. – Kh.: 2013. – # 32 (63). – 42–45. 2. Avtomatychne formatuvannya perelikiv literatury za dopomohoyu styliv APA, MLA, Chicago [Elektronnyy re-surs] [Avtory saytu]. Ofitsiynyy sayt Microsoft Office. – Elektron. dan. – Rezhym dostupu : <http://office.microsoft.com/ru-ru/word-help/HA102435469.aspx>. – Zahl. z tytul. ekranu (prohl. 13 bereznya 2014 roku). 3. Vydavnytstvo «Analitika Rodis». Rosiys'ki naukovyi retsenzovani zhurnaly. Ofitsiynyy sayt vydavnytstva. Mizhnarodni standarty oformlennya bibliografii [Elektronnyy resurs] Rezhym dostupu : <http://publishing-vak.rubibliography-international.htm>. – Zahl. z tytul. ekranu (prohl. 13 bereznya 2014 roku). 4. Cornell University Library. APA Citation Style [Elektronnyy resurs] Rezhym dostupu : <http://www.library.cornell.edu/resrch/citmanage/apa>. – Zahl. z tytul. ekranu (prohl. 13 bereznya 2014 roku). 5. Cornell University Library. MLA Citation Style [Elektronnyy resurs] Rezhym dostupu : <http://www.library.cornell.edu/resrch/citmanage/mla#online>. – Zahl. z tytul. ekranu (prohl. 13 bereznya 2014 roku). 6. Emerald Group Publishing. How to... use the Harvard reference system [Elektronnyy resurs] Rezhym dostupu : <http://www.emeraldgroupublishing.com/authors/guides/write/harvard.htm?part=2>. – Zahl. z tytul. ekranu (prohl. 13 bereznya 2014 roku). 7. DSTU HOST 7.1:2006. Bibliografichnyy zapys, bibliografichnyy opys. Zahal'ni vymohy ta pravyla skladannya : metod. rekomendatsiyi z vprovadzheniya [Tekst] ukladaly: Halevyeh O. K., Shtohryn I. M. – L'viv, 2008. – 20. 8. Kasylov O. V., Subbotyna A. V. Tekhnolohyya preobrazovannya byblyohrafycheskykh opysany [Tekst] O. V. Kasylov, A. V. Subbotyna 23-ya Mezhdunarodnaya Krymskaya konferentsyya «SVCh-tekhnika y telekommunikatsyionnye tekhnolohyy» (KryMyKo'2013). Sevastopol', 8–13 sentyabrya 2013 h. : materyaly konf. v 2 t., tom 1, N.9r – Sevastopol' : Veber, 2013. – 44-45. – ISBN 978-966-335-399-9. 9. Trebovaniya k sodержaniyu y oformleniyu rukopyshey nauchnykh statey : nauchn.-prakt. zhurnal «Ekonomika promyshlennosty». osn. NAN Ukrayny Ynstytut ekonomiky promyshlennosty. – Donetsk, 2012. – s. 14-17. 10. Web in Learning. Kak oformyt' spysok literatury dlya zarubezhnoho zhurnala [Elektronnyy resurs] Rezhym dostupu : <http://web-in-learning.blogspot.com>

Надійшла (received) 21.03.2014

Г. М. КОЛИУШКО, канд. тех. наук., ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
О. С. НЕДЗЕЛЬСКИЙ, вед. инженер, НТУ «ХПИ»;
Е. Г. ПОНУЖДАЕВА, зав. лаб. НТУ «ХПИ»;
Р. К. БОРИСОВ, канд. тех. наук., вед. науч. сотр., НИУ «МЭИ», Москва, Россия;
С. И. ХРЕНОВ, канд. тех. наук., доцент, НИУ "МЭИ", Москва, Россия;
Д. И. КОВАЛЕВ, ассистент, НИУ "МЭИ", Москва, Россия

УСТРОЙСТВО БЛОКИРОВКИ ОПЕРАТИВНЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ (УБОП) КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В статье представлены основные технические характеристики и электрическая схема устройства блокировки оперативных переключений (УБОП) коммутирующих аппаратов высокого напряжения энергообъектов. Разработанный образец УБОП имеет ряд преимуществ по сравнению с аналогами и может использоваться в комплексах электрооборудования оперативных блокировок безопасности нового поколения с «интеллектуальной» схемой управления.

Ключевые слова: устройство блокировки, кинематическая схема, электрическая схема, оперативные переключения.

Введение. Повышение надежности и безопасности выполнения оперативных переключений коммутирующих устройств высоковольтного оборудования энергообъектов (разъединители, заземлители, короткозамыкатели, ячейки комплектных распределительных устройств и т.п.) является весьма актуальной задачей. Ряд проблем решается разработкой, созданием и внедрением новых комплексов электротехнического оборудования (КЭО), в состав которых входят устройства оперативной блокировки безопасности (ОББ) с системами «интеллектуального» управления. Эти системы содержат программируемые микроконтроллерные блоки, алгоритм работы которых позволяет сохранять последовательность операций с устройствами блокировки и безошибочность действий оперативного персонала при выполнении оперативных переключений.

На объектах электроэнергетики используются устройства блокировки оперативных переключений (УБОП) различных конструкций (механические, электромеханические, электромагнитные) [1-3].

В ранее разработанных и длительное время находящихся в эксплуатации ОББ конечным звеном, посредством которого осуществлялась механическая блокировка перемещения привода переключающего устройства, являлся замок ЗБ-1 (в пластиковом корпусе), а в последнее время – замок ЗБ-1М (в силюминовом корпусе). Операции с замком производились с помощью электр

ромагнитного ключа КЭЗ-1М и магнитного ключа КМ-1М [1], которые выдавались оперативному персоналу в случае необходимости выполнения переключений. Замок ЗБ-1М содержал подпружиненный запирающий шток и контактный разъем, на который подавалось оперативное напряжение 220 В постоянного тока. Простота конструкции и малые габариты замка определяли его надежность и адаптацию к конструкциям переключающих устройств. Однако, использование оперативного напряжения 220 В увеличивало угрозу поражения электрическим током оперативного персонала.

Необходимость применения для открытия замка дополнительных элементов (ключи к КЗ-1М и КМ-1М) усложняет действия оперативного персонала, увеличивает время выполнения операций. Следует отметить, что устройство и принцип действия замка ЗБ-1М не отвечает требованиям к разрабатываемым КЭО нового поколения с «интеллектуальным» управлением системой ОББ. В частности, отсутствует индикация состояния замка «ОТКРЫТО» – «ЗАКРЫТО» посредством передачи соответствующего сигнала в систему управления ОББ, отсутствует возможность управления состоянием УБОП системой ОББ.

Описание разработок. В совместном сотрудничестве специалистами НТУ «ХПИ» (г. Харьков) и НИУ «МЭИ» (г. Москва) разработан и изготовлен опытный образец УБОП, адаптированный к КЭО ОББ нового поколения. По сравнению с указанными выше аналогами разработанный УБОП имеет ряд преимуществ:

- возможность деблокирования состояния замка УБОП «ОТКРЫТО» – «ЗАКРЫТО» системой управления ОББ;
- отсутствие необходимости использования дополнительных элементов (ключей) для операций с УБОП, в том числе и в аварийных режимах (исчезновения напряжения питания оперативных цепей);
- использование низкого напряжения питания цепей УБОП (+ 24 В), что повышает безопасность действий оперативного персонала;
- относительно малая мощность, потребляемая УБОП (4 Вт) от цепи оперативного питания при неограниченном времени включения;
- УБОП оснащено светодиодными индикаторами состояния «ПИТАНИЕ ВКЛ.» и «ОТКРЫТО»;
- УБОП имеет кабельную связь с системой управления ОББ для передачи сигнала о состоянии «ОТКРЫТО» – «ЗАКРЫТО».

Диаметр запирающего штока замка вновь разработанного УБОП и крепежные элементы присоединения к электротехническому оборудованию соответствуют замку ЗБ-1М, что обеспечивает взаимозаменяемость замковых блокирующих устройств.

Основные технические характеристики опытного образца УБОП представлены в табл. 1.

Внешний вид УБОП представлен на рис. 1

Таблица 1 – Основные технические характеристики опытного образца УБОП

Наименование характеристики	Величина и параметры
1. Рабочий ход цилиндрического запирающего штока (далее – шток), мм	14^{+2}_{-1}
2. Диаметр штока, мм	12
3. Вылет штока, мм	от 25 до 30
4. Питание	внешний источник постоянного тока с напряжением 24 В
5. Ток, А	$0,15 \pm 0,02$
6. Потребляемая мощность, Вт, не более	4
7. Усилие открытия замка, Н	
– начальное	10 ± 1
– конечное	30 ± 3
8. Габаритные размеры:	
– по оси штока, мм	125
– диаметр корпуса, мм	70
– длина корпуса, мм	80
9. Масса, кг, не более	0,6

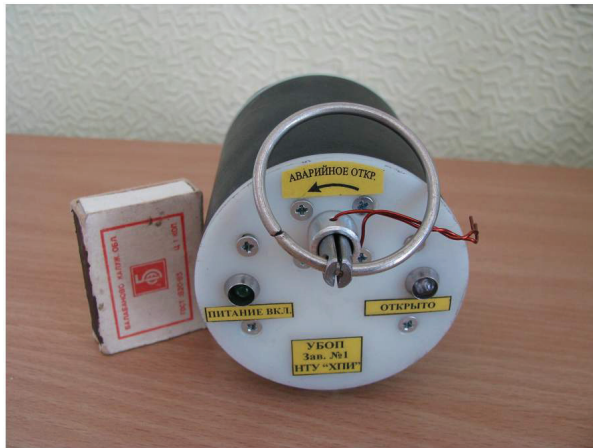


Рисунок 1 – Внешний вид опытного образца УБОП

Кинематическая схема механизма УБОП представлена на рис. 2.

В основе кинематической схемы механизма УБОП лежит принцип замкового устройства с возвратно-поступательным механическим перемещением цилиндрического стального штока, входящего в коаксиальные отверстия неподвижного и подвижного элементов механизма электротехнического коммутирующего устройства. Перемещение запирающего штока замка из положения «ЗАКРЫТО» в положение «ОТКРЫТО» осуществляется оператором при наличии разрешающего сигнала, а именно – наличием оперативного на-

пряжения (+ 24 В) на входе электрической схемы УБОП, представленной на рис. 3. Оператор, деблокирующий УБОП, должен ориентироваться на свечение индикатора «ПИТАНИЕ ВКЛ.» на передней панели УБОП, после чего он, перемещая шток 2 (см. рис. 2) за кольцо 1, переводит замок в положение «ОТКРЫТО». Механизм УБОП работает следующим образом: при отсутствии питания катушки электромагнита (ЭМ) 14 пружина 11 удерживает сердечник ЭМ 13 и толкатель 9 в положении, когда поворотный клин с рычагом 10 ограничивает осевое перемещение штока 2 из положения «ЗАКРЫТО» в положение «ОТКРЫТО».

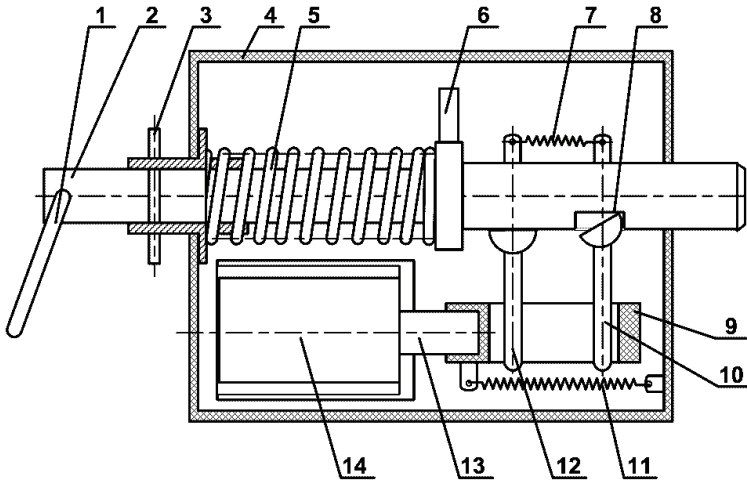


Рисунок 2 – Кинематическая схема УБОП: 1 – кольцо, 2 – шток, 3 – опломбированный фиксатор, 4 – корпус, 5 – пружина, 6 – фиксатор, 7 – пружина, 8 – паз, 9 – толкатель, 10 – поворотный рычаг, 11 – пружина, 12 – поворотный рычаг, 13 – сердечник электромагнита, 14 – катушка электромагнита

При наличии питания + 24 В постоянного тока на катушке ЭМ 14 сердечник ЭМ 13 и толкатель 9 перемещают рычаг 10 с поворотным клином таким образом, что кромка поворотного клина выходит из зацепления с пазом 8 штока 2. Это дает возможность оператору переместить за кольцо 1 шток в положение «ОТКРЫТО». Как только передняя кромка паза 8 совместится с поворотным клином рычага 12, под действием пружины 7 кромка поворотного клина 12 зафиксирует шток в положении «ОТКРЫТО». При этом начнет светиться индикатор «ОТКРЫТО» на передней крышке УБОП.

При отключении питания ЭМ возвратная пружина 11 выдвинет сердечник 13 с толкателем 9, рычаг 12 провернет клин и выведет его из зацепления с пазом 8 штока 2. Под действием пружины 5 шток 2 переместится в положение «ЗАКРЫТО» и зафиксируется поворотом клина с рычагом 10.

В конструкции УБОП предусмотрена возможность открытия замка в

аварийном режиме, вероятность возникновения которого обусловлена рядом причин:

- отсутствием оперативного напряжения;
- обрывом или коротким замыканием в цепях питания ЭМ;
- поломкой элементов механизма УБОП.

Для открытия УБОП в этом случае необходимо выполнить следующие операции:

- удалить опломбированный фиксатор 3 поворота штока 2;
- повернуть за кольцо 1 шток против часовой стрелки на 90° (до упора); при этом клин с рычагом 12 выйдет из зацепления с пазом 8 штока 2, что позволит оператору переместить шток в положение «ОТКРЫТО». Фиксация штока в этом положении обеспечивается фиксатором 6, который при повороте штока войдет в паз детали корпуса УБОП (на рисунке не показан).

Закрывание замка осуществляется поворотом штока по часовой стрелке до выхода фиксатора 6 из паза детали корпуса. Пружина 5 обеспечит перемещение штока в положение «ЗАКРЫТО».

Принципиальная электрическая схема УБОП представлена на рис. 3.

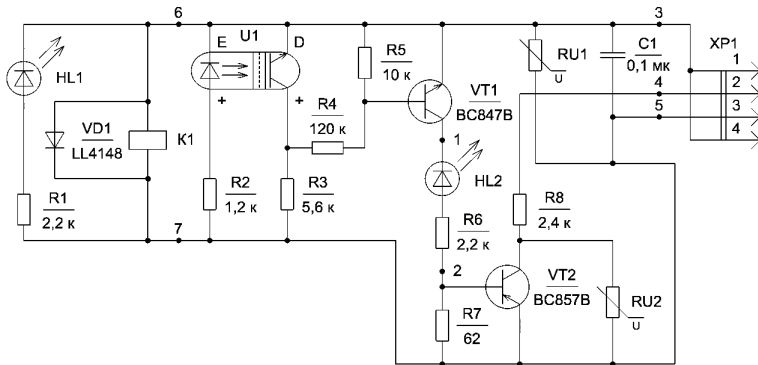


Рисунок 3 – Схема электрическая принципиальная УБОП

Схема работает следующим образом.

При подаче питания от цепей оперативного напряжения (+ 24 В) на разъем ХР1 запитывается катушка К1 электромагнита и начинает светиться индикатор НЛ1 (зеленого цвета) «ПИТАНИЕ ВКЛ.», размещенный на передней крышке УБОП. При перемещении оператором штока в положение «ОТКРЫТО» размещенный на штоке «флажок» входит в щелевой зазор оптопары U1 (TCST 1103) и перекрывает световой поток от светодиода к фототранзистору. В конечном итоге, это приводит к открытию транзистора VT1, свечению индикатора НЛ2 (красного цвета) «ОТКРЫТО» на передней крышке УБОП и появлению на контакте 2 разъема ХР1 напряжения + 24 В постоянного тока. Этот сигнал может быть использован в цепях управления ОББ. Варисторы RU1 и RU2 защищают цепи

электронного блока УБОП от возможных импульсных помех, возникающих в кабельных цепях питания и связи.

Выводы. Разработанный опытный образец УБОП обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогами и может в дальнейшем быть использован в современных КЭО с «интеллектуальной» схемой управления ОББ.

Представленная работа выполняется Национальным исследовательским университетом «МЭИ», совместно с НТУ «ХПИ».

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы: 1. Инструкция по эксплуатации оперативных блокировок безопасности в распределительных устройствах высокого напряжения. РД 34.35.512. – Союзгехэнерго, 1979. 2. Порядок организации оперативной блокировки на подстанциях нового поколения. Приложение к распоряжению ОАО «ФСК ЕЭС» № 236р от 05.05.2010. – Москва, 2010. 3. О.П. Лобак, Г.Г. Семенов Управление разъединителями, сигнализация и блокировки. – М.: Энергия, 1978.

Bibliography (transliterated): 1. Instrukcija po jekspluatacii operativnyh blokirovok bezopasnosti v raspredelitel'nyh ustrojstvah vysokogo naprjazhenija. RD 34.35.512. Sojuzgehjenergo, 1979. 2. Porjadok organizacii operativnoj blokirovki na podstancijah novogo pokolenija. Prilozenie k rasporzjazheniju ОАО "FSK EJeS" № 236r ot 05.05.2010. – Moskva, 2010. 3. O.P. Lobak, G.G. Semenov Upravlenie raz#ediniteljami, signalizacija i blokirovki. – M.: Jenergija, 1978.

Надійшла (received) 12.03.2014

УДК 621.391.825

А.И. КОРОБКО, канд. техн. наук, зав. отделом НИПКИ «Молния», НТУ «ХПИ»,

З.И.КОРОБКО, научный сотрудник, НТУ «ХПИ»

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ, НАВОДИМЫХ НА МЕЖЭЛЕМЕНТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Разработана инженерная методика определения импульсных напряжений и токов, наводимых на компонентах радиоэлектронных схем соединенных печатными проводниками, сочетающая графическое имитационное моделирование с расчетными методами конечно-разностного типа. Приведен пример реализации разработанной методики для импульсного электромагнитного поля субнаносекундного диапазона.

Ключевые слова: импульсное электромагнитное поле, радиоэлектронная схема, проводники, печатная плата, наведенные импульсные токи и напряжения.

© А.И. Коробко, З.И.Коробко, 2014

Введение. Одной из важнейших современных проблем является проблема обеспечения стойкости и защищенности радиоэлектронных систем к естественным и преднамеренным воздействиям в виде импульсных электромагнитных полей (ЭМП).

Особое место в классификации видов преднамеренных воздействий занимает импульсное сверхширокополосное ЭМП наносекундного и субнаносекундного диапазонов, свойственное проявлениям электромагнитного терморизма [1].

Одной из основных задач для решения проблемы обеспечения стойкости и защищенности радиоэлектронных систем является задача определения уровня импульсных напряжений и токов, действующих на радиоэлементы с учетом межэлементных соединений печатной платы.

Данная проблема принципиально может быть решена двумя путями: экспериментально или расчетным путем. Экспериментальный метод был в достаточной степени отработан для наносекундного диапазона воздействующих импульсных ЭМП, соответствующего амплитудно-временным параметрам электромагнитного импульса ядерного взрыва. Однако распространение этого накопленного опыта в субнаносекундную область сопровождается значительными трудностями. Эти трудности обусловлены, прежде всего, метрологическими проблемами измерений импульсных напряжений и токов, а также резко увеличивающимся влиянием первичного измерительного преобразователя на точность и достоверность измерений при переходе в субнаносекундную область.

Поэтому экспериментальный метод применяется, в основном, для определения уровней стойкости всей радиоэлектронной системы к поражающему воздействию импульсного ЭМП. Расчетные методы, получившие распространение в последнее время, базируются, в основном, на двух подходах: численное моделирование с использованием графических имитационных моделей фрагментов радиоэлектронных систем [2], или с использованием различных конечно – разностных методов [3 – 7]:

- в чистом виде;
- с использованием гибридных методов, использующих интегральные уравнения и конечно-разностный подход к их решению во временной области [8].

Эти методы дают удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных результатов во временной области [9 – 11], однако характеризуются сложностью применения в инженерной практике (конечно – разностные методы) и недостаточной точностью и ограниченностью применения (имитационные методы).

Цель работы. Целью работы является разработка инженерной методики определения импульсных напряжений и токов, наводимых на компонентах радиоэлектронной схемы, соединенных печатными проводниками, сочетаю-

шей в себе простоту использования методов расчета с графическим имитационным моделированием с точностью и достоверностью методик конечно – разностного типа.

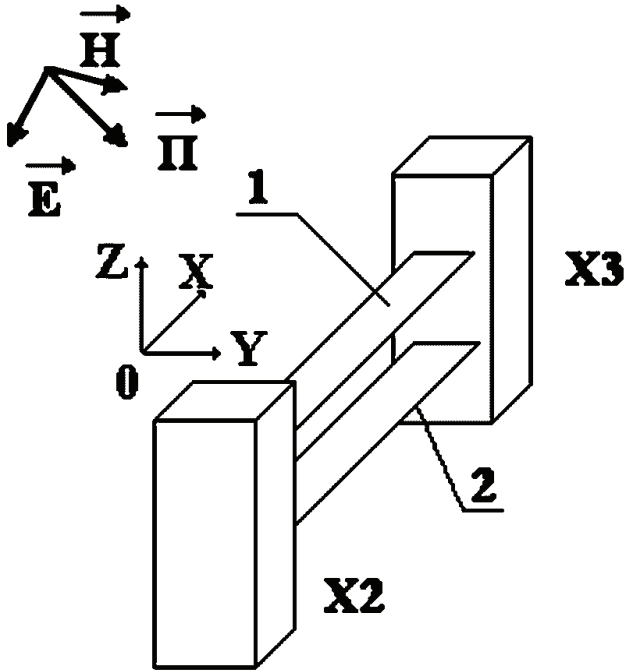


Рисунок 1 – Постановка задачи определения импульсных напряжений и токов, наведенных на радиоэлементах при воздействии импульсного ЭМП на межэлементные проводники печатной платы

Постановка задачи. На рис. 1 представлена в общем виде постановочная часть задачи по определению токов и напряжений, действующих на радиоэлементы, соединенные проводниками на печатной плате.

На часть радиоэлектронного устройства, включающую элементы X2 и X3, соединенные с помощью проводников печатной платы 1 и 2 длиной l , воздействует импульсное ЭМП с заданными ориентацией и амплитудно-временными параметрами. Проводники 1 и 2 расположены параллельно друг другу на расстоянии h , между проводниками находится диэлектрическая среда с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r .

Для решения данной задачи сделаны следующие допущения:

- элементы X2 и X3 являются сосредоточенными;
- проводники печатной платы образуют полосковую линию передачи с волновым сопротивлением Z и основной модой T -типа (время распространения

ния сигнала в поперечном сечении линии существенно меньше длительности фронта воздействующего импульсного ЭМП);

- элементы $X2$, $X3$ и сама линия не влияют на амплитудно-временные параметры воздействующего импульсного ЭМП;
- импульсы напряжения и тока от воздействия импульсного ЭМП наводятся только на проводниках печатной платы.

Описание методики. Электромагнитные процессы на расстоянии x от начала линии T характеризуются схемой замещения, представленной на рис. 2, *a*.

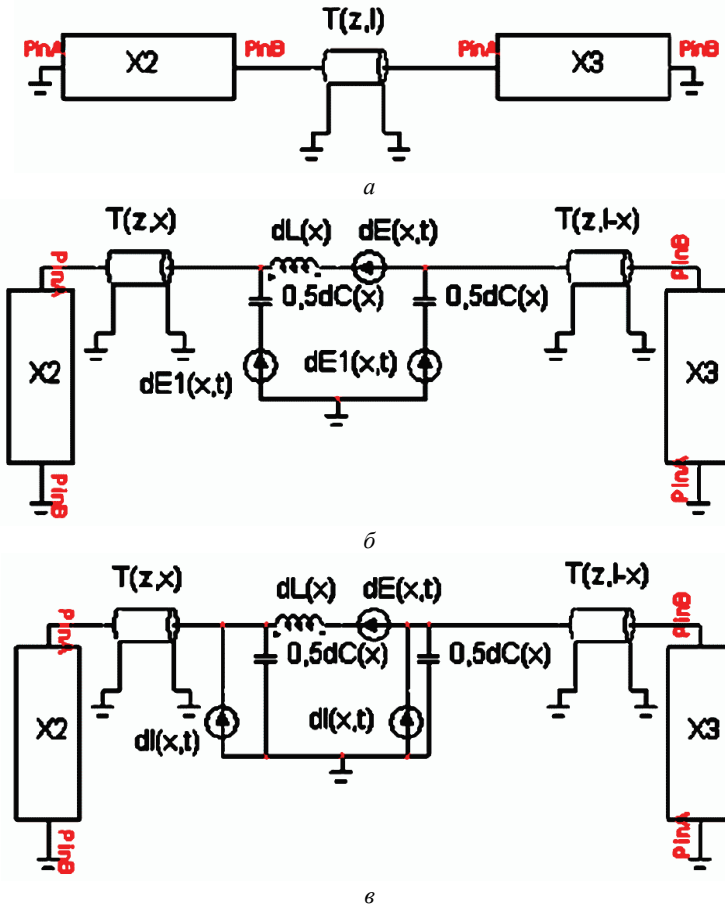


Рисунок 2 – Схема электромагнитных процессов в проводниках печатной платы

При этом линия T на отрезке dx представлена в дифференциальной форме в виде дифференциальных элементов звена Π -типа (рис. 2, б):

- продольной погонной индуктивности dL ;
- поперечной погонной емкости dC ;
- дифференциальной э.д.с. $dE(x,t)$, характеризующей взаимодействие магнитной составляющей падающего импульсного ЭМП с фрагментом схемы;
- дифференциальной э.д.с. $dE1(x,t)$, характеризующей взаимодействие электрической составляющей падающего импульсного ЭМП с фрагментом схемы.

Предлагаемая методика включает в себя следующие этапы.

1. Разложение электрической и магнитной составляющих падающего ЭМП на составляющие E_z и H_y .
2. Определение времени прихода импульсного ЭМП в точку x линии T (определение $E_z(x,t)$ и $H_y(x,t)$).
3. Определение величин dE и $dE1$:

$$dE(x,t) = h\mu_0 \frac{dH_y(x,t)}{dt} dx; \quad (1)$$

$$dE1(x,t) = \frac{hE_z(x,t)}{\epsilon_r} dx, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

4. Замена источников э.д.с. $dE1$ (с нулевым внутренним сопротивлением) источником тока $dI(x,t)$ (с бесконечным внутренним сопротивлением):

$$dI(x,t) = 0,5dC(x) \frac{dE1(x,t)}{dt} = 0,5 \frac{h}{\epsilon_r} \frac{dE_z(x,t)}{dt} dC(x) dx. \quad (3)$$

Данная замена позволяет существенно упростить дальнейший анализ процессов в схеме рис. 2, в.

Этот анализ может быть проведен как теоретическим, так и численным путем. Особенно эффективным является имитационно-разностный путь анализа, реализованный в средах компьютерного моделирования (например, Micro-Cap).

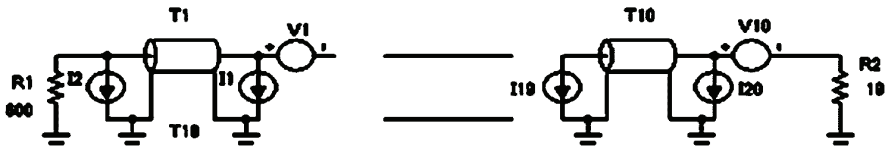


Рисунок 3 – Имитационно-разностная схема моделирования электромагнитных процессов в среде Micro-Cap с числом отрезков линии и количеством источников, равными 10

Данная среда позволяет проводить анализ переходных процессов в схемах, сочетающих радиоэлементы как с распределенными, так и сосредоточенными параметрами. Единственным ограничением среды моделирования

Micro-Cap является невозможность моделирования распределенных источников $dE(x,t)$ и $dI(x,t)$.

Поэтому для анализа переходных процессов необходимо осуществить переход от распределенных источников к сосредоточенным.

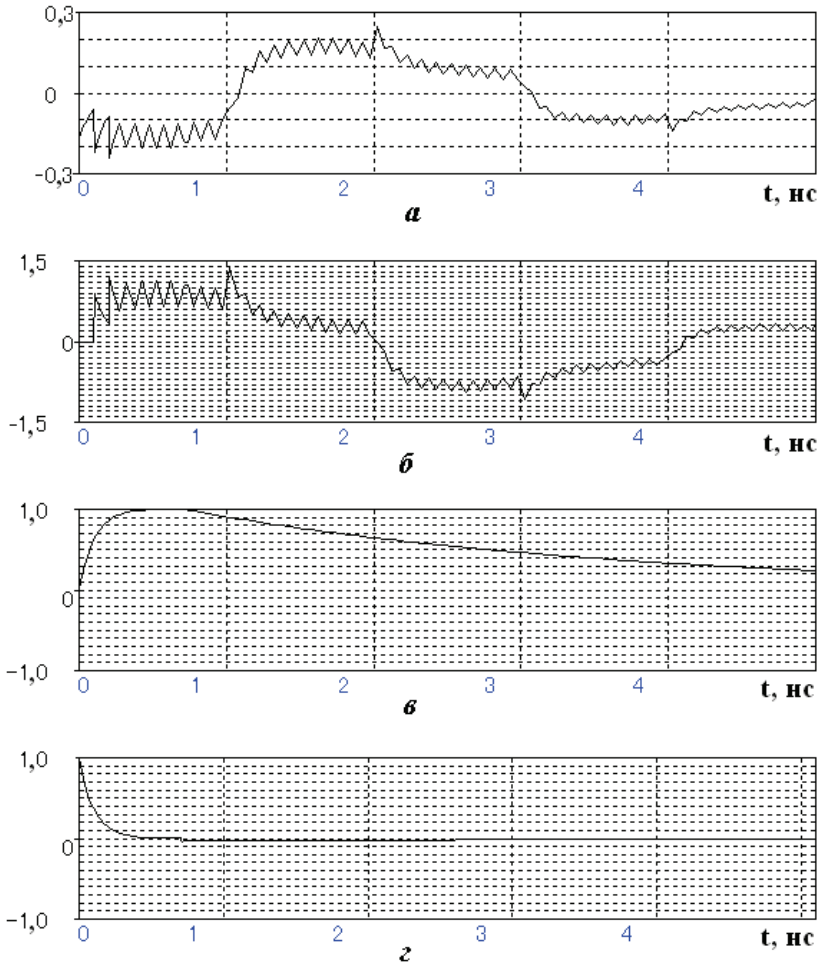


Рисунок 4 – Результаты моделирования электромагнитных процессов в проводнике печатной платы в среде Micro-Cap. *a* – напряжение на элементе X3 (10 Ом); *б* – напряжение на элементе X2 (600 Ом); *в* – временная зависимость падающего ЭМП; *г* – временная зависимость производной по времени падающего ЭМП

То есть осуществить замену распределенных параметров и распределенных источников линии T , конечным количеством отрезков линий и конечным

количеством сосредоточенных источников.

Естественно, что точность и достоверность полученных результатов анализа возрастает с увеличением количества отрезков линий и количества сосредоточенных источников. В общем случае их количество выбирается из условий «продольной квазистационарности» электромагнитных процессов на длине каждого из отрезков линий.

Другими словами время распространения электромагнитной волны по каждому из отрезков должно быть существенно меньше характерных временных параметров источников.

Из анализа выражений (1-3) следует, что для линейного случая максимальные значения источников прямо пропорциональны производной по времени координатных составляющих воздействующего ЭМП. Следовательно, для импульсного ЭМП, воздействующего на межэлементные соединения печатной платы, характерным временем является длительность «фронта» производной от функции, описывающей временную зависимость воздействующего ЭМП.

Полученные результаты. Для иллюстрации возможностей описанной методики был проведен анализ наведенных импульсных токов и напряжений (в относительном виде) в схеме, со следующими параметрами:

- элементы $X2$ и $X3$ имеют чисто активный импеданс равный, соответственно величинам 600 Ом и 10 Ом;
- полосковая линия Т (см. рис. 2, а) моделировалась десятью одинаковыми звеньями T1, V1, I1, I2 – T10, V10, I19, I20;
- волновое сопротивление линий Т во всех звеньях одинаково и равно величине 50 Ом;
- время задержки каждого звена равно величине 0,1 нс.

Выводы

1. Для случая элементов, соединенных с межэлементными проводниками печатной платы, максимальные значения импульсов напряжения и тока, наведенных на элементах, прямо пропорциональны производной по времени от функции, описывающей временную зависимость воздействующего ЭМП.

2. В отличие от известных имитационно-разностных методов, использующих разностную схему решений по переменной «время» в данном подходе применен новый метод, использующий разностную схему для представления источников в дискретном виде.

3. Данная методика не имеет принципиальных ограничений по следующим характеристикам:

- линейности как характеристик радиоэлементов, так и линейности схемы замещения проводников печатной платы;
- по виду представления характеристик радиоэлементов (можно использовать все виды моделей элементов, заложенных в среду Micro-Cap – начиная от матрицы s-параметров и кончая Spice-моделями реальных радиоэлементов);

– виду анализа (в частотной или временной области).

4. Точность и достоверность результатов определяются исключительно количеством отрезков линии и источников и достаточно просто контролируется в процессе моделирования (чем выше версия программы Micro-Cap, тем большее количество отрезков линии она позволяет моделировать).

Список литературы: 1. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / Под ред. Т.Р.Газизова. – Томск: Томский государственный университет, 2002. – 206 с. 2. Гайнутдинов Р.Р. Прогнозирование электромагнитных помех в межсоединениях печатных плат цифровых электронных средств при преднамеренном воздействии сверхширокополосного электромагнитного импульса / Р.Р. Гайнутдинов, З.М. Гизатуллин // Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – № 3 (34). – С. 44–52. 3. Lee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – May, 1996. – Vol. 14. – P. 302–307. 4. Baum C.E. Electromagnetic topology for the analysis and control of complex systems // Fast Electrical and Optical Measurements. – Thompson J.E. & Heussen L.H.- Nijhoff, Dordrecht, 1986. – Vol. 1. – P. 467-547. 5. Baum C.E., Liu T.K., Tesche F.M. On the analysis of general multiconductor transmission line networks // Interaction Note 461. – January 1988. 6. Cerry G., Russo P. A MFIE-FDTD hybrid method for the evaluation of the field inside metallic enclosures with slots // Proceeding of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Zurich, 2003. – P. 653-656. 7. Parmentier J.-P., Labaune G., Alliot J.-C., Degauque P. Electromagnetic topology on complex systems: topological approach // Interaction Note 488. – May 1988. 8. Marco L. Radiated susceptibility on the Printed-Circuit-Board level: simulation and measurement // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. – 2005. – Vol. 3. – P. 471-478. 9. Parmentier J.-P. at al. An application of electromagnetic topology theory on the test – bed aircraft EMPTAC // Interaction Note 506. – Nov. 1993. 10. Parmentier J.-P. at al. Analysis of EM coupling on large scale structures using EM topological concepts: application to the EMPTAC aircraft // Proc. ICEAA'95 Symp. – Torino, 12-15 Sept., 1995. – P. 81-84. 11. Parmentier J.-P. at al. An application of electromagnetic topology on the test-bed aircraft EMPTAC-ETE III // Interaction Note 527. – May, 1997.

Bibliography (transliterated): 1. Gajnutdinov, Z.M. Gizatullin Tehnologii jelektrornagnitnoj sovmestimosti.- 2010.- №3 (34).- 44 – 52. -ISSN 1729-2670.Jelektrornagnitnyj terrorizm na rubezhe tysjacheletij pod red. T.R.Gazizova. – Tomsk: Tomsnij gosudarstvennyj universitet, 2002. – 206.-ISBN 5-94621-035-1 2. Gajnutdinov R.R. Prognozirovanie jelektrornagnitnyh pomeh v mezhsjoedeninijah pechatnyh plat cifrovyh jelektrornnyh sredstv pri prednamerennom vozdejstvii sverhshirokopolosnogo jelektrornagnitnogo impul'saR.R.. 3. Lee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media IEEE Trans. on Antennas and Propagation.- Vol.14.- May, 1996. – 302 – 307. 4. Baum C.E. Electromagnetic topology for the analysis and control of complex systems Fast Electrical and Optical Measurements. – Vol. 1. – Thompson J.E. & Heussen L.H.- Nijhoff, Dordrecht, 1986. – 467-547. 5. Baum C.E., Liu T.K., Tesche F.M. On the analysis of general multiconductor transmission line networks Interaction Note 461. – January 1988. 6. Cerry G., Russo P. A MFIE-FDTD hybrid method for the evaluation of the field inside metallic enclosures with slots Proceeding of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Zurich, 2003. – 653-656. 7. Parmentier J.-P., Labaune G., Alliot J.-C., Degauque P. Electromagnetic topology on complex systems: topological approach Interaction Note 488. – May 1988. 8. Marco L. Radiated susceptibility on the Printed-Circuit-Board level: simulation and measurement IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. – 2005. – Vol. 3. – 471- 478. 9. Parmentier J.-P. at al. An application of electromagnetic topology theory on the test – bed aircraft EMPTAC Interaction Note 506. – Nov. 1993. 10. Parmentier J.-P. at al. Analysis of EM coupling on large scale structures using EM topological concepts: application to the EMPTAC aircraft Proc. ICEAA'95 Symp. - Torino, - 12 – 15 Sept., 1995. – 81-84. 11. Parmentier J.-P. at al. An application of electromagnetic topology on the test-bed aircraft EMPTAC-ETE III Interaction Note 527. – May, 1997.

Надійшла (received) 06.03.2014

В.И. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»
А. И. КОРОБКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»
И. В. ЯКОВЕНКО, д-р физ.-мат. наук, профессор, НТУ «ХПИ»

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ФАКТОРОВ НА ВОЛНОВОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ

Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых структур в условиях воздействия электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ) на электрорадиоизделия часто сопровождается появлением токов в проводящих элементах изделий и появлением внутренних полей.

Ключевые слова: собственные колебания, полупроводниковые структуры, импульсное электромагнитное излучение.

Введение. Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния электромагнитного излучения на функционирование электрорадиоизделий относятся к области необратимых отказов, которые характеризуются полной утратой работоспособности. Моделирование механизмов влияния наведенных ЭМИ токов и напряжений на рабочие характеристики изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. При этом вопросы связанные с определением различного рода электромагнитных взаимодействий, протекающих непосредственно в комплектующих изделия при воздействии излучения остаются открытыми.

Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в области исследований обратимых отказов, для которых характерна временная утрата работоспособности, приводящая к искажению выходных характеристик изделия. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике.

Основные результаты. В настоящей работе исследуются механизмы затухания поверхностных колебаний, когда их взаимодействие с электронами проводимости в условиях воздействия внешнего электромагнитного излучения на электрорадиоизделия носит характер столкновений.

Кинетическое уравнение для поверхностных плазмонов имеет вид:

$$\frac{\partial N_{\bar{q}}}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum |W_{k_1 q k_2}|^2 \delta(E_1 - E_2 - \hbar\omega_{\bar{q}}) [(N_{\bar{q}} + 1)n_{\bar{k}_1} (1 - n_{\bar{k}_2}) - N_{\bar{q}} n_{\bar{k}_2} (1 - n_{\bar{k}_1})] \quad (1)$$

где N_q – число поверхностных плазмонов в состоянии; $E_{1,2} = \frac{\hbar^2 k_{1,2}^2}{2m}$ – закон дисперсии электронов; $W_{k_1 q k_2}$ – матричный элемент, характеризующий вероятность перехода электронов между состояниями $k_1 \rightarrow k_2$. Первый член правой части уравнения описывает процесс спонтанного и индуцированного излучения поверхностных плазмонов при переходе электронов из состояния k_1 в состояние k_2 ; второй – процессы поглощения плазмонов при обратных переходах. В левой части уравнения отсутствует член $v_{ep} \frac{\partial N_q}{\partial \vec{r}}$, поскольку предполагается, что плазмоны не обладают дисперсией и их групповая скорость равна нулю. Особенность кинетического уравнения заключается в том, что закон сохранения импульса плазмонов и электронов выполняется только в направлении параллельном границе раздела сред, поскольку пространство вдоль оси OY неоднородно:

$$k_{1x} = k_{x2} + q_x; \quad k_{1z} = k_{z2} + q_z.$$

Предполагается, что плазменная среда (среда 1) занимает область пространства $0 \leq y \leq L$ ($\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}$). Границы $y = 0$; $y = L$ являются идеально отражающими, а области $y < 0$; $y > L$ занимает диэлектрик (вакуум) $\varepsilon_2 = \varepsilon_d$. Глубина проникновения поля плазмона остается малой по сравнению с L , то есть поля локализованы на границах $y = 0$; $y = L$ независимо друг от друга. Мы рассмотрим взаимодействие электронов и плазмонов вблизи границы $y = 0$.

Выражение для гамильтониана взаимодействия электронов с плазмонами, определяющее матричный элемент $W_{k_1 q k_2}$, имеет вид:

$$\hat{H}^{(int)} = -\frac{1}{c} \int \hat{j}(r) \hat{A}(r) dr. \quad (2)$$

Здесь A – вектор-потенциал (с калибровкой $div \vec{A} = 0$; $\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$).

Он выражается через операторы рождения и уничтожения плазмонов (соответственно: $\hat{a}_q^{(+)}(t) = \hat{a}_q \exp(i\omega t)$; $\hat{a}_q(t) = \hat{a}_q \exp(-i\omega t)$) следующим образом:

$$A_\alpha(\vec{r}, t) = \sum_q A_\alpha(\vec{q}) \vec{e}_\alpha e^{i\vec{q}\vec{r}} [\hat{a}_q(t) + \hat{a}_{-q}^{(+)}(t)];$$

$$e_{1x} = e_{2x} = \frac{q_x}{q\sqrt{2}}; \quad e_{1y} = -e_{2y} = \frac{i}{\sqrt{2}}; \quad e_{1z} = e_{2z} = \frac{q_z}{q\sqrt{2}}; \quad q = \sqrt{q_x^2 + q_z^2};$$

$$\omega_{-q} = \omega_q = \omega; \quad q_y = -iq; \quad y < 0; \quad q_y = iq; \quad y > 0. \quad (3)$$

Величина A_q находится в результате квантования энергии электромаг-

нитного поля поверхностного плазмона

$$\widehat{H}^{(em)} = \frac{\omega^2}{8\pi c^2} \int [\widehat{A}(\omega, r)]^2 \frac{d}{d\omega} (\omega \varepsilon(\omega)) d\vec{r}, \quad (4)$$

где интегрирование проводится по всей области локализации поверхностного плазмона. Подставляя в (4) $[\widehat{A}(\omega, r)]^2$, приравнявая

$H^{(em)} = \sum \frac{\hbar \omega_q}{2} [\widehat{a}_q \widehat{a}_q^+ + \widehat{a}_q^+ \widehat{a}_q]$, получим $A_q = \left(\frac{4\pi e^2 \hbar q c^2}{S \omega_q (\varepsilon_o + \varepsilon_d)} \right)^{1/2}$, где S – площадь поверхности образца.

Переходя в кинетическом уравнении (1) от суммирования к интегрированию ($\sum k_y = \frac{L}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk_y$) получим следующее выражение для декремента

$$\gamma = \frac{W_0^2 V L}{4\pi^3 m \hbar \omega_q^2} \int_{k_y > 0} dk k_y^+ k_y^2 (n_{k^{(+)}} - n_k). \quad (5)$$

Рассмотрим случай максвелловского распределения электронов:

$$n_k = n_0 \frac{(2\pi\hbar)^3}{(2\pi m T)^{3/2}} \exp\left(-\frac{\hbar^2 k^2}{2mT}\right).$$

Подставляя значения W_0 ; n_k в формулу (5) и используя закон дисперсии поверхностных плазмонов $\omega_q^2 = \frac{\omega_0^2}{\varepsilon_0 + \varepsilon_d}$ получим:

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\pi}} q_x v_T \left(\frac{T}{\hbar \omega} \right) \left(\exp\left(-\frac{\hbar \omega}{T}\right) - 1 \right) \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \sqrt{x^2 + \frac{\hbar \omega}{T}} \exp(-x^2) dx. \quad (6)$$

Легко убедиться, что формула (5) в предельных случаях дает те же значения декремента, что и выражения (6).

В случае вырожденного электронного газа разность $n_{k^+} - n_k = n_k(\varepsilon_F + \hbar \omega) - n_k(\varepsilon_F)$ при $\varepsilon_F \gg \hbar \omega$ можно представить в виде $\frac{\partial n_k}{\partial \varepsilon_F} \hbar \omega$, где $\frac{\partial n_k}{\partial \varepsilon_F} = n_k \delta(\varepsilon - \varepsilon_F)$; $n_k = 1$. В результате интегрирования (5) получим снова выражение) для γ в случае зеркального отражения электронов от границы.

Исследуем механизмы спонтанного излучения частиц, когда $N_q \ll 1$. Рассмотрим излучение, создаваемое одной частицей $n_k = \delta_{kk_0}$, движущейся со скоростью v_0 . В этом случае из уравнения (1) следует при $q_x \ll k_x$; $q_z \ll k_z$:

$$\frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t} = \frac{4mL}{\hbar^3} \int_0^{\infty} |W_{k_0, k_y}|^2 \delta\left(k_0^2 - k_y^2 - \frac{2m\omega_q}{\hbar}\right) dk_y. \quad (7)$$

Принимая во внимание условие $k_0^2 \gg \frac{2m\omega_q}{\hbar}$, определим мощность спонтанного излучения электрона:

$$\hbar\omega_q \frac{\partial N_{\bar{q}}}{\partial t} = \frac{4\pi e^2 q v_0^3}{V\omega_0^2}. \quad (8)$$

Если число электронов в состоянии « k_0 » равно n_{k_0} , то правую часть необходимо умножить на эту величину. Сравним мощность излучения с величиной потерь энергии частицы при ее отражении от границы раздела сред.

Поля, создаваемые частицей, будем описывать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{E}(\vec{r}, t) &= 0; \quad \text{div } \vec{D} = 4\pi e \delta(x) [\delta(y - v_0 t) + \delta(y + v_0 t)] \delta(z); \\ \vec{D}(\vec{r}, t) &= \int_{-\infty}^t \varepsilon(t - t') \vec{E}(\vec{r}, t') dt'; \quad y > 0; \\ \text{rot } \vec{E}(\vec{r}, t) &= 0; \quad \text{div } \vec{D} = 0; \\ \vec{D}(\vec{r}, t) &= \varepsilon_d \vec{E}(\vec{r}, t); \quad y < 0. \end{aligned} \quad (9)$$

При интегрировании по $d\omega$ учитывалась частота столкновений $\nu \ll \omega$ для выбора правильного обхода полюсов: $\omega = -\frac{i\nu}{2} \pm \omega_q$.

Потери энергии частицы на возбуждение поверхностного плазмона в единицу времени $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$ определяются из уравнения движения:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = e v_0 E_y. \quad (10)$$

В эту формулу следует подставить значение поля (9) в точке нахождения частицы $x = 0$; $y = v_0$; $z = 0$. Далее необходимо усреднить выражение для потерь энергии по времени пролета частицей области взаимодействия с волной в прямом и обратном направлениях: $\tau = \frac{2L}{v_0}$. Тогда средние потери энергии частицы в единицу времени на возбуждение q -гармоники поля плазмона принимают вид:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\hbar\omega_q \frac{\partial N_{\bar{q}}}{\partial t}. \quad (11)$$

Из (8) можно найти изменение числа электронов $n_{k_1} = n_{k_0} \delta_{k_1 k_0}$ в состоянии k_0 при их переходе в состояние k в результате спонтанного излучения поверхностных плазмонов ($N_q \rightarrow 0$). Выполняя интегрирование получим:

$$\frac{\partial n_{k_0}}{\partial t} = -n_{k_0} \frac{4\pi e^2 q v_0^3}{V\omega_0^2 \hbar\omega_q}; \quad \frac{\partial n_k}{\partial t} = -\frac{\partial n_{k_0}}{\partial t}. \quad (12)$$

Таким образом, определение механизмов и величин декрементов затухания поверхностных плазмонов на границе полупроводник – диэлектрик, основанные на представлениях о волнах Ван-Кампена и получение расчетных соотношений (6), (8), (12) позволяют оценивать искажения вольт-амперных характеристик полупроводниковых радиоизделий при наличии внешних электромагнитных полей (наеденных токов).

Показано, что затухание колебаний такого рода связано с тем, что колебания возбуждают на границе раздела сред волны Ван-Кампена, которые модулируются полем поверхностной волны и уносят энергию поля вглубь среды.

Выводы. Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа поверхностных плазмонов в результате их взаимодействия с электронами проводимости.

Приведены решения данного кинетического уравнения, определяющие декремент колебаний и мощность спонтанного излучения частиц в условиях воздействия внешнего электромагнитного излучения на полупроводниковые комплекты радиоизделий.

Полученные в работе выражения для декрементов бесстолкновительно-го затухания оверхностных колебаний, когда взаимодействие волн и частиц носит характер случайных столкновений, позволяют определять области генерации (области обратимых отказов) рабочих характеристик полупроводниковых приборов (гетеро и гомо переходов, P–П переходов).

Список литературы: 1. *Мырова Л.О., Чепиженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988, 235 с. 2. *Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А.* Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. *Стил М., Вюраль Б.* Взаимодействие волн в плазме твердого тела. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. *Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М.* Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с. 5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

Bibliography (transliterated): 1. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ioniziruyuschim elektromagnitnym izlucheniyam. – M.: Radio i svyaz', 1988. – 235. 2. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Elektromagnitnye vliyaniya na sooruzheniya svyazi. – M.: Radio i svyaz', 1979. – 225. 3. Stil M., Vyural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. – M.: Atomizdat, 1973. – 312. 4. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D. D., Yakovenko V.M. Elektromagnitnye yavleniya SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. – K.: Naukova dumka, 1991. – 216. 5. Zi S. Fizika poluprovodnikovyh priborov. – M.: Mir, 1984. – 456.

Надійшла (received) 01.04.2014

В. И. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»;
И. В. ЯКОВЕНКО, д-р физ.-мат. наук, профессор, НТУ «ХПИ»

МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Определены механизмы генерации колебаний полупроводниковых структур, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, полупроводниковые структуры.

Введение. Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в области исследований обратимых отказов, характеризующихся временной потерей работоспособности изделия. В ней рассматривается влияние токов, наведенных внешним электромагнитным излучением на волновые процессы, приводящие к искажению рабочих характеристик полупроводниковых структур, используемых в современной СВЧ – электронике.

Используемые модели механизмов возникновения отказов полупроводниковых приборов в большинстве своем, относятся к области необратимых отказов, характеризующихся полной потерей работоспособности и обычно ограничены рамками теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой), но не дают возможность определять искажения рабочих характеристик при сохранении работоспособности изделия в целом.

1. Основные результаты. Объектом исследования является (полупроводниковая сверхрешетка). Предполагается, что в результате воздействия ЭМИ, в периодической структуре, состоящей из полупроводниковых пластин, возникает поток заряженных частиц, который теряет часть своей энергии на возбуждение ее собственных электромагнитных колебаний. В настоящей работе исследуются механизмы взаимодействия наведенных внешним излучением токов с электростатическими колебаниями подобных структур. Получены выражения для собственных частот и механизмы их генерации, т.е. определены энергетические потери наведенных ЭМИ токов на их возбуждение

© В. И. Кравченко, И. В. Яковенко, 2014

Для описания электромагнитных свойств структуры состоящей из плазменных слоев, в пренебрежении эффектами запаздывания, воспользуемся следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div}(n_0 \vec{v} + \vec{v}_0 n); \quad m \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + v_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \right) &= e \vec{E}; \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= 0; \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \operatorname{div}[N_0(z) \vec{u}] &= 0; \quad m \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = e \vec{E}; \\ \operatorname{div}[\varepsilon_0(z) \vec{E}] &= 4\pi e(N + n). \end{aligned} \quad (1)$$

Определим спектр и затухание (нарастание) электромагнитных колебаний такой системы. Выбираем систему отсчета таким образом, чтобы оси X , Y были направлены параллельно, а ось Z – перпендикулярно границе раздела. Заметим, что потери энергии заряженной частицы при прохождении через слой диэлектрик впервые рассматривались в работе [3].

Здесь $n(r,t)$, $N(r,t)$, $v(r,t)$, $u(r,t)$ – возмущенные концентрации и скорости электронов пучка и неподвижной плазмы, $\varepsilon_0(z)$; $N_0(z)$ – являются периодическими функциями, принимающими в пределах $d = d_1 + d_2$ значения $\varepsilon_{01;02}$; $N_{01;02}$. Индексы «1» и «2» будут означать принадлежность величин, входящих в уравнения (4.66) к слоям с индексами толщины «1» и «2». В дальнейшем необходимо ввести скалярный потенциал $\varphi(r,t)$; ($\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$).

На границе слоев выполняются условия непрерывности потенциалов и полных токов J_i (смещения и проводимости):

$$\begin{aligned} J_i &= \frac{\varepsilon_{0i}}{4\pi} \frac{\partial E_{iz}}{\partial t} + e(N_{0i} u_{iz} + n_0 v_{iz} + v_0 n_i); \quad i = 1, 2. \\ \varphi_1(0) &= \varphi_2(0); \\ J_1(0) &= J_2(0). \end{aligned} \quad (2)$$

В связи с образованием в структуре волн пространственного заряда (ВПЗ), обусловленных движущимся потоком частиц, возникает необходимость в дополнительных граничных условиях. В качестве таковых используются непрерывности потоков заряженных частиц и их импульсов. Используя свойство трансляционной симметрии $\varphi(z+d) = \varphi(z) \exp(ikd)$ (k – произвольный волновой вектор), можно представить граничные условия на плоскостях, разделяющих слои, следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi_1(d_1) &= \varphi_2(-d_2) \exp(ikd); \quad J_1(d_1) = J_2(d_2) \exp(ikd); \\ n_1(d_1) &= n_2(-d_2) \exp(ikd); \quad v_{1z}(d_1) = v_{2z}(-d_2) \exp(ikd). \end{aligned} \quad (3)$$

Представляя зависимость всех переменных величин от координат и времени экспоненциальной, легко получить решение уравнений в каждом слое. С помощью граничных условий (2)–(3) можно исключить неопределенные константы и получить дисперсионное уравнение, связывающее между собой

частоту, волновые векторы – ω , $q_{x,y}$, k и параметры среды.

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = \cos \lambda_1 d_1 \cos \lambda_2 d_2 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}{2\lambda_1 \lambda_2} \sin \lambda_1 d_1 \sin \lambda_2 d_2. \quad (4)$$

Здесь $\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - \frac{\omega_{0i}^2}{\omega^2}$; $\lambda_i = \frac{\omega_0}{v_0 \sqrt{\varepsilon_i}}$; ω_{0i} ; ω_0 – ленгмюровские частоты

электронов неподвижной плазм.

Это уравнение впервые было получено в работе [4], где была показана возможность возникновения неустойчивых состояний. При этом в [4] не принимались во внимание связанные с частотной дисперсией диэлектрической проницаемости собственные колебания, существующие в структуре в отсутствие пучка.

В случае малой плотности пучка $\lambda_1 d_1 \ll 1$; $\lambda_2 d_2 \ll 1$ уравнение (4) преобразуется к виду:

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = 1 - \frac{\omega_0^2 d^2}{2v_0^2 \varepsilon_{zz}}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_{zz}(\omega) = d\varepsilon_1 \varepsilon_2 / (d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1)$ – компонента тензора диэлектрической проницаемости мелкодисперсной среды. Закон дисперсии колебаний имеет тот же вид, что и в однородной среде, диэлектрическая проницаемость которой равна $\varepsilon_{zz}(\omega, d_1, d_2)$. Из выражения (5) в приближении малой плотности пучка полагая получим:

$$\Delta\omega^2 = \frac{\omega_0^2}{\varepsilon_{zz}(\omega = kv_0)}; \quad \Delta\omega \ll kv_0. \quad (6)$$

В этом случае возникают колебания с частотой, определяемой временем пролета τ частицей пространственного периода структуры $\tau = \frac{d}{v_0}$. Целое число l равно отношению времени пролета к периоду колебаний.

Колебания становятся неустойчивыми при условии $\varepsilon_{zz} < 0$ ($\Delta\omega^2 < 0$), то есть диэлектрическая проницаемость хотя бы одного из слоев должна обладать частотной дисперсией и быть отрицательной.

Инкремент неустойчивости равен:

$$\text{Im } \Delta\omega = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\omega_0^2 \omega_{p1} d_1}{2\varepsilon_{01} d} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где $\omega_{p1} = \frac{\omega_{01}}{\sqrt{\varepsilon_{01}}}$.

Если $\omega = kv_0$ то мы имеем неустойчивость в условиях черенковского ре-

зонанса с инкрементом, который в $\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\frac{1}{3}}$ раз меньше чем в однородной

плазме. В случае $\omega_p = \frac{2\pi\nu_0}{d}l$ неустойчивость связана с черенковским параметрическим излучением заряженной частицы [3]. Из выражения (6) следует, что неустойчивость возникает также при условии когда ε_{zz} является комплексной величиной и $\text{Re } \varepsilon_{zz} > 0$.

Исследуемая модель взаимодействия наведенных токов и колебаний в полупроводниковых комплекующих ЭРИ является достаточно универсальной и позволяет рассмотреть ряд частных случаев наиболее интересных при проведении экспериментов по определению критериев стойкости в области обратимых отказов.

Выводы. Количественные оценки показывают, что величина энергии излучения лежит в пределах чувствительности современных приемников излучения субмиллиметрового диапазона ($\frac{\partial W}{\partial t} \approx 10^{-11}$ Вт).

Предложена модель взаимодействия наведенных внешним ЭМИ токов с электростатическими колебаниями полупроводниковой сверхрешетки, основанная на реализации резонансного (черенковского) взаимодействия движущихся зарядов и электромагнитных колебаний в условиях, когда совпадают фазовая скорость волны и скорость заряженной частицы.

Получены расчетные соотношения, связывающие величину инкремента неустойчивостей с величиной наведенных токов и параметрами МДП – структур: концентрацией свободных носителей, диэлектрической проницаемостью, размерами структуры.

Список литературы: 1. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. Стил М., Вюраль Б. Взаимодействие волн в плазме твердого тела. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. – К.: Наукова думка, 1991.– 216 с. 5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

Bibliography (transliterated): 1. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ioniziruyuschim elektromagnitnym izlucheniyam. – M.: Radio i svyaz', 1988. – 235. 2. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Elektromagnitnye vliyaniya na sooruzheniya svyazi. – M.: Radio i svyaz', 1979. – 225. 3. Stil M., Vyural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. – M.: Atomizdat, 1973. – 312. 4. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Yakovenko V.M. Elektromagnitnye yavleniya SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. – K.: Naukova dumka, 1991.– 216. 5. Zi S. Fizika poluprovodnikovyh priborov. – M.: Mir, 1984. – 456.

Надійшла (received) 11.03.2014

М. П. ЛАБЗУН, канд. техн. наук, инженер, Юго-западная электроэнергетическая система, Винница;

П. Д. ЛЕЖНЮК, д-р техн. наук, профессор, Винницкий Национальный технический университет;

А. Е. РУБАНЕНКО, канд. техн. наук, доцент, Винницкий Национальный технический университет;

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

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ОТКАЗЫ КОНДЕНСАТОРОВ СМА -166/ 3-14 В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГОСИСТЕМЕ УКРАИНЫ

Приведены результаты исследования и причин ухудшения изоляционных свойств и показателей надежности высоковольтных конденсаторов связи СМА-166/ $\sqrt{3}$ – 14УХЛ1.

Ключевые слова: высоковольтный конденсатор связи, показатели надежности, полипропиленовая изоляция, конденсаторное масло.

Введение. По мере развития электроэнергетических систем, увеличения напряжения и протяженности высоковольтных линий электропередач, оснащения их устройствами высокочастотной релейной защиты и противоаварийной автоматикой, возникает необходимость в надежной диспетчерской и административно-хозяйственной связи между электрическими станциями и подстанциями, в передаче сигналов телемеханики, противоаварийной автоматики и релейной защиты (передачи дискретных команд ускорения и блокировки защит, передачи токового сигнала дифференциальной фазной защиты линий), аварийного отключения высоковольтных выключателей, автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии и других данных. Одним из видов используемого при этом оборудования, являются высоковольтные **конденсаторы связи (КС)**, которые пропускают сигналы высокой частоты по каналам связи, либо используются для присоединения аппаратуры связи к линиям электропередачи и грозозащитным тросам.

Конденсаторы связи предназначены для обеспечения высокочастотной связи на частотах 24 – 1500 кГц в линиях электропередач номинальным напряжением 35 – 750 кВ. На основе высоковольтных конденсаторов делаются измерительные устройства (делители, не резонирующие трансформаторы напряжения) – для измерения напряжений ЛЭП, а также устройства отбора мощности для питания измерительной аппаратуры и силового оборудования. Учитывая важность задач, решаемых с использованием КС, к их показателям надежности предъявляются высокие требования. Так, например, средний срок эксплуатации КС типа СМА-166/ $\sqrt{3}$ –14 УХЛ1, в соответствии с паспортными данными, со-

ставляет 25 лет, а вероятность безотказной работы – 0,9.

Цель настоящей работы – выяснение возможных причин ухудшения характеристик изоляции секций конденсаторов, не выработавших свой ресурс.

Проведенный анализ показателей эксплуатационной надежности КС свидетельствуют о том, что в октябре 2013 года в Юго-Западной электроэнергетической системе (ЮЗЭС) Украины выявлено и выведено из эксплуатации 12 из 30 имеющихся КС типа СМА-166/ $\sqrt{3}$ –14 УХЛ1, 2008 года выпуска, производства ООО «УККЗ» (Усть-Каменогорский конденсаторный завод, Казахстан), которые имеют неудовлетворительные изоляционные характеристики (возрастание емкости и тангенса угла диэлектрических потерь). Поэтому такой показатель надежности, как вероятность безотказной работы КС СМА-166/ $\sqrt{3}$ –14 УХЛ1 с 0,9 фактически снизился до 0,6 за 4-5 лет (с 2009 года ввода в эксплуатацию) использования КС по прямому назначению.

Исследуемые конденсаторы связи находились в эксплуатации на высоковольтных (линейное напряжение 330 кВ) воздушных линиях электропередач, например, связывающих ОРУ 330 кВ Днестровской ГЭС-1 с ОРУ 330 кВ подстанции «Каменец-Подольская 330 кВ». По результатам предварительных испытаний все конденсаторы данной партии имели отклонения от паспортных значений емкости не более 1 %, а значения тангенса угла диэлектрических потерь $tg \delta$ не превышали 0,07 %. За несколько лет эксплуатации параметры двенадцати конденсаторов превысили нормативные значения. Так у одиннадцати КС параметры ухудшились до значений в диапазонах: $tg \delta = 0,24–0,79$ %; $\Delta C = 16–93$ %; а в одном – при $tg \delta = 0,48$ % изменение емкости составило: $\Delta C = 235$ % (емкость КС увеличилась с 14 нФ до 46 нФ). Известно, что емкость каждого исправного конденсатора составляет около 14 нФ. Произвольно выбранные для диагностики несколько из поврежденных конденсаторов были разобраны и исследованы для выявления дефектов. Выемная часть каждого конденсатора состоит из 6 стянутых в стопку пакетов с помощью двух гетинаксовых планок, и размещена в фарфоровом корпусе с металлическими фланцами. КС пропитан предположительно конденсаторным маслом. В каждом пакете содержится 18 последовательно соединенных секций. Размер плоско-мотанной секции составил 140×190 мм при толщине секции около 8 - 9 мм. Обкладки выполнены из алюминиевой фольги толщиной 9 мкм и шириной 120 мм. Изоляция выполнена из 4 слоев полипропиленовой пленки толщиной 10 мкм каждая. Длина намотки изоляции составляет 16 метров. Расчетное значение емкости совпадает с измеренным значением емкости здоровой секции. При вскрытии дефектных секций, емкость которых не соответствует паспортным данным (в большинстве равна нулю) обнаружено повреждение до 50 % секций в виде видимых следов сквозного или ниточного внутреннего пробоя изоляции (рис. 1) и в виде пробоя по поверхности в средней торцевой части секции (рис. 2), конструктивно примыкающей к стяжной гетинаксовой планке (на рис. 2, планка отсутствует), стягивающей пакет секций по высоте.



Рисунок 1 – Следы пробоев внутри секций (слева сквозной – поз. 1, справа – ниточный, следы побежалости – поз. 2)

Также при размотке внутри секций наблюдались участки со следами коричневого налета (следов побежалости) на поверхности слоев пленки. Причем места ниточного пробоя располагались как в местах следов налета, так и в зонах без видимых загрязнений слоев пленки. Нижняя группа секций в разобранных конденсаторах не была повреждена. Наибольшее количество поврежденных секций находились на второй сверху группе секций, что наблюдалось и при термографическом исследовании в процессе эксплуатации (рис. 3) на двух последовательно включенных конденсаторах связи.



Рисунок 2 – Торцы 2-х секций с зоной почернения в средней части на участке контакта с гетинаксовой планкой

Результат термографического анализа подтверждается результатами вскрытия 2 дефектных КС и их разборки одного в ВНТУ и другого в ЮЗЭС. Так в разобранном в ВНТУ конденсаторе количество пробитых секций в каждом пакете, начиная с первого сверху, составило 14, 15, 10, 10, 2, 0 (рис. 4). В средних группах количество пробитых секций не превышало 10. Необходимо отметить, что даже при таком количестве пробитых секций (51 секция) КС сняты с эксплуатации по причине увеличения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь выше паспортных значений, хотя номинальное напряжение еще выдерживали. При этом на здоровых секциях напряжение превышало номинальное практически вдвое, что свидетельствует о высоком ка-

честве пленки. Увеличение тепловыделения в пакетах с большим количеством дефектных секций вызвано, на наш взгляд, увеличением тангенса угла диэлектрических потерь и сопротивления канала пробоя дефектных секций.

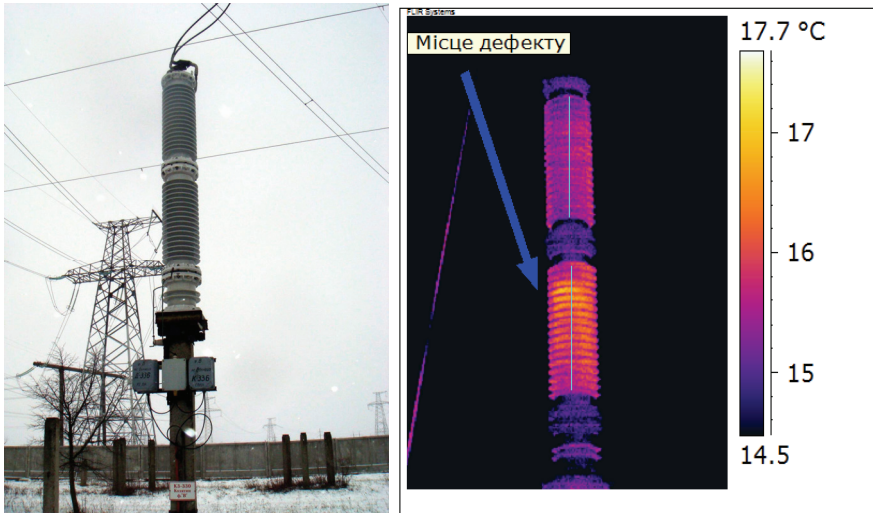


Рисунок 3 – Два КС на подстанции и термограмма КС в эксплуатации

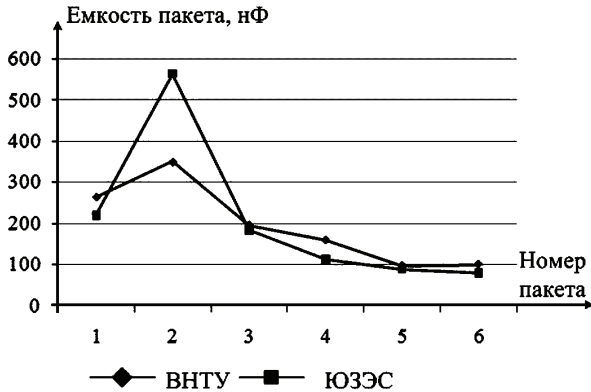


Рисунок 4 – Зависимость емкости пакета от номера пакета

Одной из возможных причин пробоя является применение некачественных гетинаксовых планок, стягивающих пакет из шести последовательно соединенных пакетов секций. На это указывает область почернения на торцевой поверхности секции в месте контакта с гетинаксовой планкой. Так федеральная сетевая компания единой энергетической системы России отмечает, что по результатам внеочередных испытаний забракованы КС на двух ВЛ 500

кВ (отклонение емкости и тангенса выше допустимых норм). Причина повреждения является заводской брак – применение некачественного гетинакса в КС типа СМА (В)-166/3-18УХЛ1 и типа СМА (В)-166/3-14УХЛ1 поставки 2007 г. Проведена полная замена более 100 КС [2]. Второй возможной причиной является неравномерное распределение напряжения по последовательно соединенным пакетам секций вследствие допустимого отклонения значений емкостей и различной степени запрессовки пакетов секций [3]. При последовательном соединении секций общая емкость конденсатора составит

$$C_k^{-1} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}, \quad (1)$$

где C_k – емкость конденсатора; C_i – емкость или i -той последовательно-соединенной секции (при $n = 108$) или i -го последовательно соединенного пакета (при $n = 6$).

Напряжение на i -той секции будет равно:

$$U_i = \frac{U_0 C_k}{C_i} = \frac{U_0}{C_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}}. \quad (2)$$

Для предельного распределения напряжения, когда в конденсаторе из n последовательно включенных пакетов секций ($n-1$) последовательно включенные емкости равны между собой и превышают номинальное значение емкости на k_1 %. А n -я емкость меньше номинальной на k_2 %. Тогда напряжение на n -той емкости составит:

$$U_n = \frac{U_0(1+0,01k_1)}{(n-1)(1-0,01k_2)+1+0,01k_1}. \quad (3)$$

А коэффициент перенапряжения η на n -той секции будет равен:

$$\eta = \frac{U_n}{U_0} = \frac{nU_n}{U_0} = \frac{n(1+0,01k_1)}{(n-1)(1-0,01k_2)+1+0,01k_1}. \quad (4)$$

Например, для 3^x вариантов соединения секций: $k_1 = 20$ %, $k_2 = 5, 10, 15, 20$ %; $k_1 = 10$ %; $k_2 = 5, 10, 15, 20$ %; $k_1 = 0$ %; $k_2 = 5, 10, 15, 20$ % результаты расчета в виде кривых зависимостей $\eta = f(n)$ приведены на рис. 5. В реальных конструкциях СК СМА–166/√3 – 14УХЛ1 (значение $n = 6$ для числа последовательно соединенных пакетов секций, а суммарное количество элементарных последовательно включенных секций составит 108). На рис. 5 приведены результаты расчета для $n \leq 20$. Кроме того, коэффициент перенапряжения увеличивается незначительно при увеличении n более 20. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 5, показывает, что при указанных значениях допусков на емкость (20 %) возможны перенапряжения на одном из 6 пакетов конденсатора, превышающие номинальные значения от 1,2 до 1,4 раз. По результатам обследования реальных секций определено значения емкостей элементарных здоровых секций и групп двух дефектных конденсаторов. Емкость каждой из непробитых элементарных секций соответствует паспортно-

му значению 1,43-1,45 мкФ, что соответствует емкости всего конденсатора, равной 13,4 мкФ, из 108 последовательно соединенных секций. Отклонение по значению емкости каждой секции не превышает 1,5 %, что согласно рис. 5 не может быть причиной дефекта конденсатора вследствие низкого уровня перенапряжений. Действительно, если даже емкость одной из шести последовательно включенных групп секций меньше на 1,5 %, чем каждой из других пяти, то по формуле (4) коэффициент перенапряжения η составит 1,013. Воспользовавшись известной зависимостью ресурса M от напряженности электрического поля E [4]:

$$M \sim E^{-\beta_1}, \quad (5)$$

где $\beta_1 = 5 \div 8$ при разрушении диэлектрика у края обкладок, найдем, что уменьшение ресурса будет незначительным, даже меньше, чем в η^8 , что составляет менее 10 %.

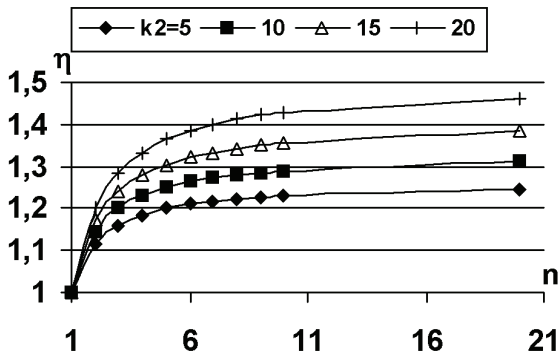


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента перенапряжения η от количества последовательно включенных секций при $k_1 = 20$ %

Таким образом, анализ результатов показал, что при таком большом числе последовательно соединенных секций влияние допуска по емкости будет незначительным и не может привести к пробую.

Причинами отказов могут быть: попадание влаги через уплотнительные резиновые кольца между верхним фланцем и корпусом, недопропитка пленочной изоляции между слоями (небольшие пузырьки воздуха между слоями пленки), наличие отдельных пупырышек (от частиц, предположительно, пыли) и отдельных редких коричневых пятен (цвета побегалости) размером в несколько квадратных сантиметров между слоями пленки, а также старение пленки, контактирующей с конденсаторным маслом. На возможную причину отказов вследствие **увлажнения** указывает наличие ржавчины в месте расположения верхней резиновой прокладки (рис. 6). Однако, при таком механизме ухудшения диэлектрических свойств изоляции наибольший процент числа дефектных секций должен наблюдаться в нижних пакетах секций, поскольку

плотность воды больше плотности масла, что не соответствует реальной картине при разборке КС. Причина отказов вследствие некачественной заводской **технологии изготовления**, на которую указывают места пробоев не на краю обкладок [5], а в различных местах по площади обкладок (см. рис. 1) вполне возможна, но должна проверяться в условиях заводского изготовления. А наличие значительно большего числа дефектных секций в верхних пакетах КС может быть связана с меньшим коэффициентом запрессовки верхних секций. **Старение** пропитанного конденсаторным маслом полипропиленового пленочного КС в условиях эксплуатации происходит под длительным влиянием электрического и теплового поля, а также механического нагружения. Кроме частичных разрядов наиболее серьезным недостатком, влияющем на снижение надежности КС является ухудшение электрофизических характеристик полипропиленовой пленки и ароматического жидкого диэлектрика вследствие постепенного растворения полимерного диэлектрика в жидком диэлектрике, что определено их химическим составом и строением. Указанное взаимодействие компонентов, которое детально исследовано в диссертации [6], имеет термоактивационную природу и проявляется в набухании полипропиленовой пленки с последующим растворением аморфной составляющей полимера в пропитывающей жидкости. Как следствие имеют место необратимые структурные изменения пленки, которые приводят к снижению ее электрической и механической прочности, а также увеличению диэлектрических потерь жидкого диэлектрика. Введение в последние 20 лет в конструкцию силовых высоковольтных конденсаторов изоляции из полипропиленовой пленки вместо апробированных длительной эксплуатацией пропитанных бумажных конденсаторов требует более тщательного исследования старения пленочной изоляции в пропитывающем конденсаторном масле и контроля технологии.



Рисунок 6 – Налет ржавчины в месте расположения верхней резиновой прокладки

Выводы. 1. У 40% СК 2008 г. выпуска (12 штук СК) типа СМ-166/3-14 УХЛ обнаружены неудовлетворительные изоляционные характеристики при

сроке эксплуатации – 5лет, что не соответствует паспортным показателям надежности. 2. Наиболее реальной причиной ухудшения изоляционных характеристик изоляции является применение в конструкции некачественных гетинаксовых стяжных планок, что возможно приводит к появлению перекрытий по торцевой поверхности секций, контактирующей с гетинаксовой планкой (рис. 2), что также замечено в этот же период в единой энергетической системе России [2]. 3. Основным диагностическим параметром, который определяет дефект изоляции для данной партии КС, является увеличение емкости, которое вызвано пробоем части последовательно включенных секций и уменьшением числа последовательно включенных здоровых секций. 4. Следует обратить внимание на обоснование причины пробоя большого количества секций в верхних группах и более глубокое исследование ресурса полипропиленовой изоляции, пропитанной конденсаторным маслом. 5. Видимо также необходимо обратить внимание производителей на необходимость улучшения качества и усиления контроля при технологическом процессе изготовления СК.

Список литературы: 1. Конденсаторы связи и отбора мощности для линий электропередач: ГОСТ 15581-80 – [Дата введения 1981-01-07]. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1989. – 41 с. 2. Демет'ев Ю. А. Итоги и задачи внедрения новых технологий. Анализ работы проблемного оборудования на ПС 220-1150 кВ в условиях ОЗП 2008/2009 годов [Электронный ресурс] / Ю. А. Демет'ев // Доклад начальника Департамента систем передачи и преобразования электроэнергии. – Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы России, 2009. – 29 с. – Режим доступа: <http://www.myshared.ru/slide/682798/#>. 3. Рудаков В.В. Влияние технологического допуска по емкости на схему соединения секций высоковольтных импульсных конденсаторов / Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю., Рудаков С.В. // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск. Електроенергетика і перетворююча техніка. – Х.: НТУ «ХП», 2004. – № 35 (1033). – С. 136-143. 4. Техника высоких напряжений : учебник для вузов / И.М.Богатенков, Ю.Н.Боcharов, Н.И.Гумерова, Г.М.Иманов и др. Под ред. Г.С.Кучинского. –СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с. 5. Бржезицький В.О., Исакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: навч. посібник / Бржезицький В. О., Исакова А. В., Рудаков В. В. та ін. За ред. В.О.Бржезицького та В.М.Михайлова. – Х.: НТУ «ХП» – Торнадо, 2005. – 930 с. 6. Журавлев С. П. Влияние термоактивационного взаимодействия на электрофизические характеристики компонентов изоляции полипропиленовых конденсаторов промышленной частоты : дис. канд. техн. наук: 05.09.02 / Журавлев Сергей Петрович. – СПб, 2003. – 204 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kondensatory svyathi I otbora moshnosti dlja linij elektropredach GOST 15581-80-[Data vvedeniya 1981-01-07]. – M. IPK Izdatelstvo standartov, 1989. – 41. 2. Dement'ev Y.A. Itogi i zadachi vnedreniya novyh tehnologij. Analiz raboty problemnogo oborudovaniya na PS 220-1150 kV v uslovijah OZP 20082009 godov [Elektronnyj resurs] Y.A. Dement'ev Doklad nachalnika Departamenta system peredachi I preobrazovaniya elektroenergii. – Federalnaja setevaja kompanija Edinoj energeticheskoj sistemy Rossii, 2009. – 29. – Reggym dostupa: www.myshared.ru/slide/682798. 3. Rudakov V.V. Vlianie tehnologicheskogo dopuska po emkosti na shemu soedineniya sekzij visokovoltnih impulsnih kondensatorov Rudakov V.V.,Dubijchuk O.Y., Rudakov S.V.Vestnik NTU «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Tematichnyj vypusk. Elektrotehnika I peretvoryuyucha tehnika. – H.: NTU «HPI», 2004. – № 35 (1033). – 136-143. 4. Tehnika vysokih naprjaggenij : uchebnik dlja vuzov I.M. Bogatenkov, Y.N. Bocharov, N.I.Gumerova, G.M. Imanov I

dr. Pod red. G.S.Kuchinskogo. – SPb.: Energoatomizdat, Sankt-Peterburgskoe otdelenie, 2003. – 608. 5. Tehnika I elektrofizyka vysokih naprug : navch. posibnyk Brggezitskij V.O., Isakova A.V., Rudakov V.V. ta in. Tha red. V.O. Brggezitskogo ta V.M.Myhajlova. – H.: NTU «HPI» – Tornado, 2005. – 930. 6. Gguravlev S. P. Vlijanie termoaktivatsionogo vzaimodejstvija na elektrofizicheskie harakteristiki komponentov izoljatsii polipropilenovyh kondensatorov promyshlenoj chasty:dis. kand. teh. nauk:05.09.02 Gguravlev Sergej Petrovich.

Надійшла (received) 18.03.2014

УДК 621.317.3

Ю.С.НЕМЧЕНКО, гл. метролог, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;

ИЗМЕРЕНИЕ ЭМИССИИ ТОКОВ РАДИОПОМЕХ ОТ БОРТОВОГО АВИАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Описана современная методика измерения эмиссии тока радиопомех от бортового авиационного оборудования с помощью токосъемника ТС-А, созданного и прокалиброванного в Испытательной лаборатории НИПКИ «Молния». Эта методика позволяет реализовать требования к измерению таких токов по всем действующим в Украине нормативным документам в полном объеме.

Ключевые слова: эмиссия тока радиопомех, токосъемник, бортовое авиационное оборудование.

Работающее бортовое авиационное оборудование (БАО) генерирует и излучает радиопомехи как в «эфир», так и в отходящие от БАО линии электропитания, линии связи и т.д. Этот процесс называется эмиссией, а радиопомехи в проводниках – кондуктивными. Радиопомехи, попадая внутрь других БАО, вызывают у них или сбои, или даже отказы. Поэтому эмиссию радиопомех всех видов нормируют. Одним из важнейших видов эмиссии радиопомех являются токи радиопомех (ЭТРП) в отходящих от БАО проводниках, т.к. нормы на эти токи присутствуют во всех действующих в Украине стандартах, в отличие других видов радиопомех.

Ниже приведены нормы на ЭТРП (нормы – это предельно допустимые значения радиопомех) для БАО, располагаемых на военных самолетах (ОСТ В1 02696-90 [1] и Нормы ГКРЧ 11А-84 [2]) и на гражданских самолетах (КТ-160D [3] – аналог американского стандарта DO-160 D, уже несколько лет действующего в Украине).

Как видно из этих графиков ЭТРП как по амплитуде, так и по диапазону частот перекрывают несколько порядков:

– по частоте от 1,5 кГц до 100 МГц;

© Ю.С.Немченко, 2014

– по амплитуде от 20 дБ мкА (10 мкА) до 118 дБ мкА (0,8 А).

Поэтому измерение ЭТРП является сложной инженерной задачей.

В Испытательной лаборатории (ИЛ) НИПКИ «Молния» для измерения ЭТРП применяется токосъемник типа ТС-А (рис. 5).

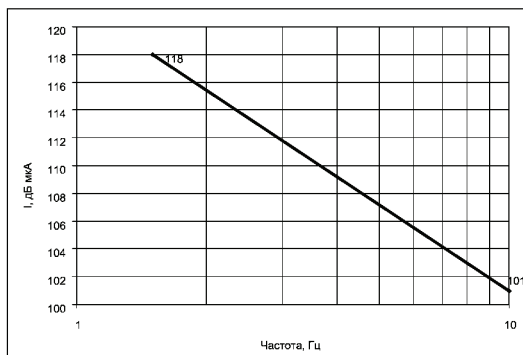


Рисунок 1 – Нормы эмиссии кондуктивных токов радиопомех от БАО в диапазоне частот от 1,5 до 10 кГц (Нормы ГКРЧ 11А-84)

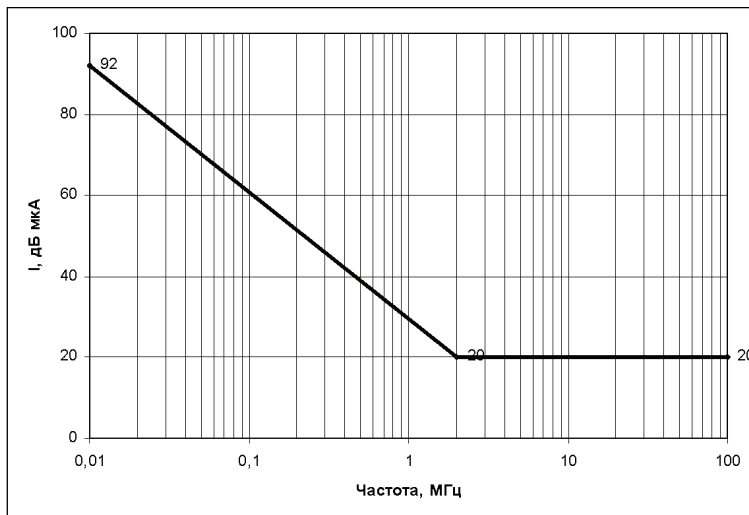


Рисунок 2 – Нормы эмиссии кондуктивных токов радиопомех от БАО в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц (ОСТ В1 02696-90)

ТС-А представляет собой высокочастотное ферритовое кольцо с размерами 120x80x25 мм, на котором размещен объемный виток измерительного преобразователя (ИП-ТС), соединяемый при помощи штатного измерительного кабеля (ИК-ТС) с измерительным селективным устройством. При изме-

рениях ЭТРП проводник, в котором протекает измеряемый ток, пропускают через ферритовое кольцо ТС-А. Вокруг проводника возникают кольцевые силовые линии магнитного поля, которые сосредоточены, в основном, внутри ферритового кольца. Эти силовые линии пронизывая измерительный виток ИП-ТС перпендикулярно его плоскости наводят в нем э.д.с., которая является мерой измеряемого тока. Т.о. ТС-А – это одновитковый пояс Роговского.

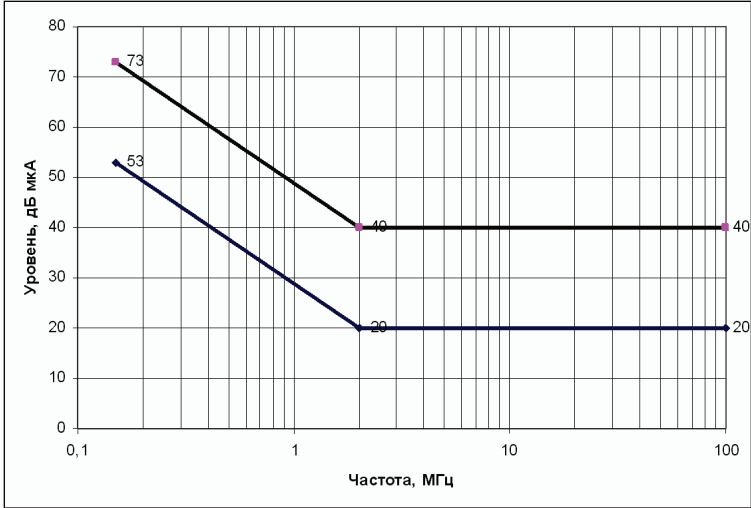


Рисунок 3 – Нормы эмиссии кондуктивных токов радиопомех от БАО (линии электропитания) в диапазоне частот от 150 кГц до 100 МГц (КТ-160D)

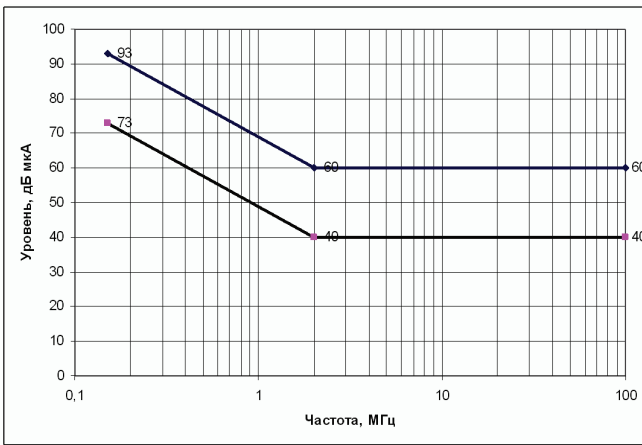


Рисунок 4 – Нормы эмиссии кондуктивных токов радиопомех от БАО (линии связи) в диапазоне частот от 150 кГц до 100 МГц (КТ-160D)

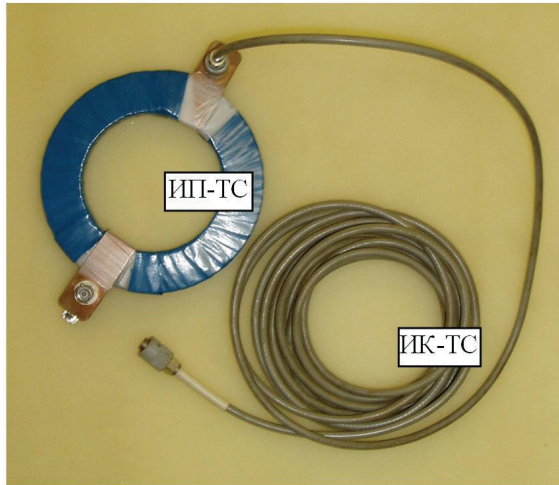


Рисунок 5 – Общий вид ТС-А

Упрощенная схема замещения ТС-А приведена на рис. 6, где L_{II} – индуктивность ИП; R_{III} – входное сопротивление измерительного прибора; U_{III} – напряжение на выходе ТС-А; I_{III} – ток, протекающий в ТС-А; e_{II} – э.д.с., наводимая в ИП.

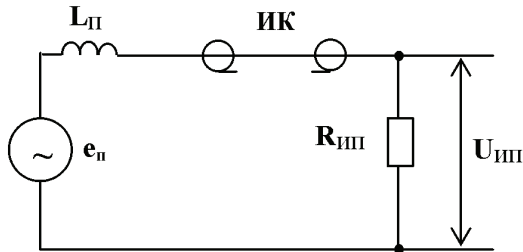


Рисунок 6 – Схема замещения ТС-А

$$e_{II}^{max} = -\mu_0 \mu_r s w \frac{dH(t)}{dt}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость ферритового кольца; s – площадь витка, м²; $w = 1$, количество витков; $H(t)$ – напряженность магнитного поля, пронизывающего виток.

Так как измеряются гармонические составляющие ЭТРП, то

$$H(t) = H_{max} \cdot \sin \omega t. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) получим

$$e_{II}^{max} = -\mu_0 \mu_r s w \omega H_{max}. \quad (3)$$

Связь между H_{max} и измеряемым током I_{PI} устанавливается законом полного тока, по которому

$$H_{max} = \frac{I_{PI}^{max}}{2\pi r_{cp}}, \quad (4)$$

где $2\pi r_{cp}$ – длина средней силовой линии магнитного поля в ферритовом кольце. Подставляя (4) в (3) получим окончательное выражение для

$$e_{II}^{max} = \frac{-\mu_0 \mu_r S \omega I_{PI}^{max}}{2\pi r_{cp}} = K_{III} \cdot \omega \cdot I_{PI}^{max}, \quad (5)$$

где $K_{III} = \frac{-\mu_0 \mu_r S \omega}{2\pi r_{cp}}$ (предварительно считаем, что $\mu_r = \text{const}$).

Так как нас интересует напряжение на входе измерительного прибора U_{III} , то для нахождения его связи с e_{II} , а следовательно и с I_{PI}^{max} , необходимо проанализировать схему по рисунку 6. Анализ этой схемы показывает, что

$$U_{III}^{max} = I_{III}^{max} \cdot R_{III} = \frac{e_{II}^{max}}{\omega L_{II} + R_{III}} \cdot R_{III} = K_{III} \frac{\omega}{1 + \frac{\omega L_{II}}{R_{III}}} \cdot I_{PI}^{max}. \quad (6)$$

Данное уравнение (6) имеет три частных решения.

Решение № 1 имеет место при $\omega L_{II} \ll R_{III}$, то есть в низкочастотной области АЧХ ТС-А. В этом случае

$$U_{III}^{max} = K_{III} \cdot \omega \cdot I_{PI}^{max}, \quad (7)$$

то есть напряжение на выходе измерительного приемника прямо пропорционально частоте измеряемого тока.

Решение № 2 имеет место при $\omega L_{II} \gg R_{III}$, то есть в высокочастотной области АЧХ ТС-А. В этом случае

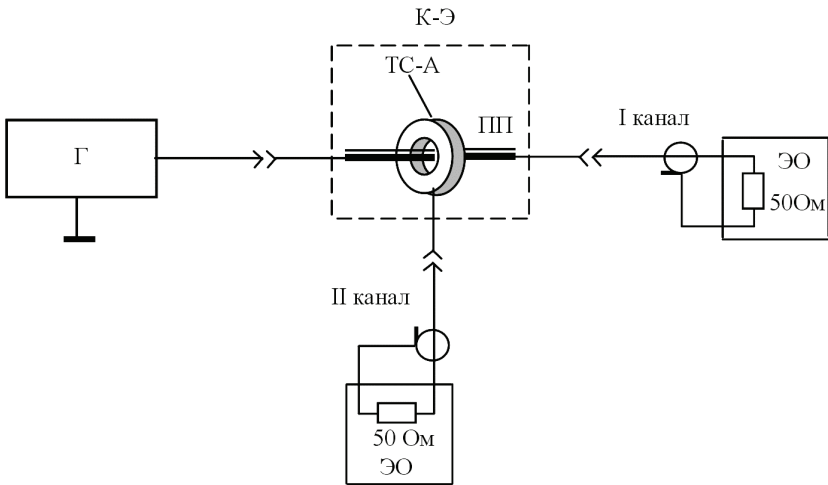
$$U_{III}^{max} = K_{III} \frac{1}{\frac{L_{II}}{R_{III}}} \cdot I_{PI}^{max}, \quad (8)$$

то есть напряжение на выходе измерительного приемника пропорционально величине измеряемого тока (данный режим работы называется самоинтегрирующим с постоянной интегрирования $T_{II} = \frac{L_{II}}{R_{III}}$).

Решение № 3 имеет место при $\omega_1 L_{II} < R_{III} < \omega_2 L_{II}$, то есть в такой области АЧХ ТС-А, где ω_1 лежит в верхней части области частот по решению № 1, а ω_2 – в нижней части по решению № 2. В этом случае напряжение на входе измерительного приемника имеет более сложный вид, чем решения № 1 и № 2.

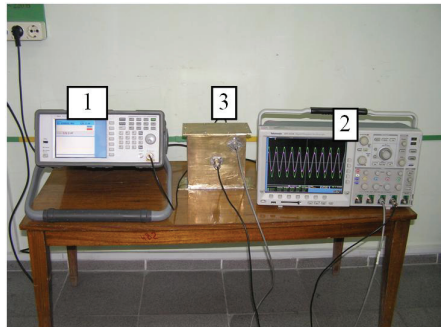
Так как коэффициент K_{III} рассчитать сложно, то его определение произ-

водится практически путем калибровки ТС-А. Схема калибровки ТС-А приведена на рис. 7, а рабочее место – на рис. 8.



- Г – высокочастотный генератор Agilent 9310A;
- ПП – прямолинейный проводник
- ИП-ТС – измерительный преобразователь токосъемника;
- ИК-ТС – измерительный кабель токосъемника;
- К-Э – корпус-экран;
- 50 Ом – входное сопротивление осциллографа;
- ЭО – осциллограф ТЕКТРОНИХ DPO 4104

Рисунок 7 – Схема калибровки токосъемника при определении его АЧХ



- 1 – высокочастотный генератор Agilent 9310A;
- 2 – осциллограф ТЕКТРОНИХ DPO 4104;
- 3 – корпус-экран К-Э с размещенными в нем прямолинейным проводником и измерительным преобразователем ИП-ТС

Рисунок 8 – Рабочее место при калибровке ТС-А

Методика калибровки заключается в следующем:

1. Прямолинейный проводник (ПП) подключается с одной стороны к высокочастотному генератору Г, а с другой стороны – к осциллографу со входным сопротивлением $R_{ПП} = 50 \text{ Ом}$.

2. Измерительный преобразователь ИП-ТС одевается на ПП, а его выход – подключается к осциллографу. ИП ТС-А заключается в металлический корпус-экран (КЭ) для исключения влияния на результаты калибровки внешних электромагнитных полей и ориентации измерительного кабеля относительно «земли» (в области высоких частот больше 10 МГц).

3. По каналу 1 осциллографа при помощи генератора Г устанавливаем нижнюю частоту 1,5 кГц и величину 500 мВ (это соответствует калибровочному току $I_K = 10 \text{ мА} = 80 \text{ дБ мкА}$).

4. По каналу 2 осциллографа, подключенному к выходу ИП-ТС, регистрируем $U_{ИП}$ в милливольтках, которое затем переводим в децибелы.

5. Рассчитываем коэффициент калибровки ТС-А по формуле:

$$K_K(\text{дБ}) = I_K(\text{дБ}) - U_{ИП}(\text{дБ}). \quad (9)$$

6. Перестраивая частоту генератора от 1,5 кГц до 100 МГц и поддерживая постоянным значение $I_K(\text{дБ}) = 80 \text{ дБ}$, замеряем напряжение $U_{ИП}(\text{дБ})$ на выходе ТС-А (рис. 9).

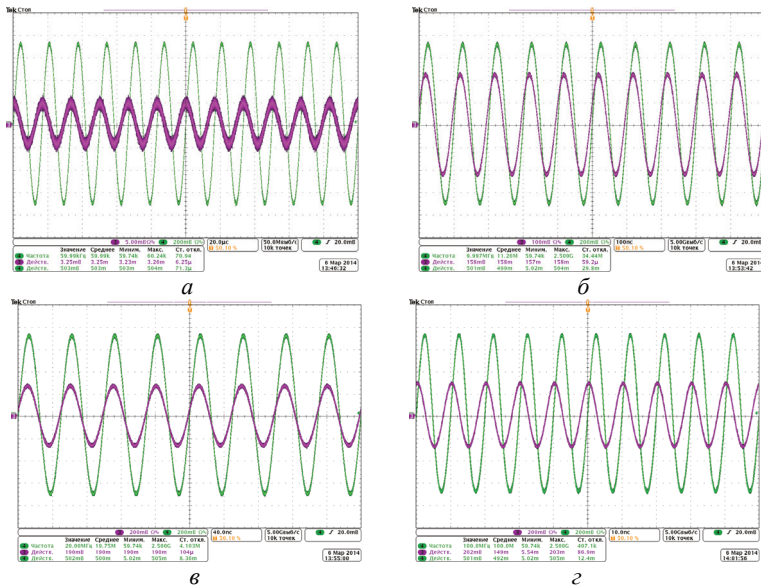


Рисунок 9 – Типовые осциллограммы калибровочного тока (большая синусоида) и напряжение на выходе ТС-А (меньшая синусоида) на различных калибровочных частотах: а – F = 60 кГц; б – F = 10 МГц; в – F = 20 МГц; г – F = 100 МГц

7. По результатам измерений строим АЧХ ТС-А, то есть значение K_K (дБ) от частоты (рис. 10).

Из рис. 10 видно, что в диапазоне частот от 1,5 кГц до 1 МГц напряжение на выходе ТС-А имеет значение по решению № 1; в диапазоне частот от 20 МГц до 100 МГц напряжение на выходе ТС-А имеет значение по решению № 2; а в диапазоне частот от 1 МГц до 2 МГц напряжение на выходе ТС-А имеет значение по решению № 3.

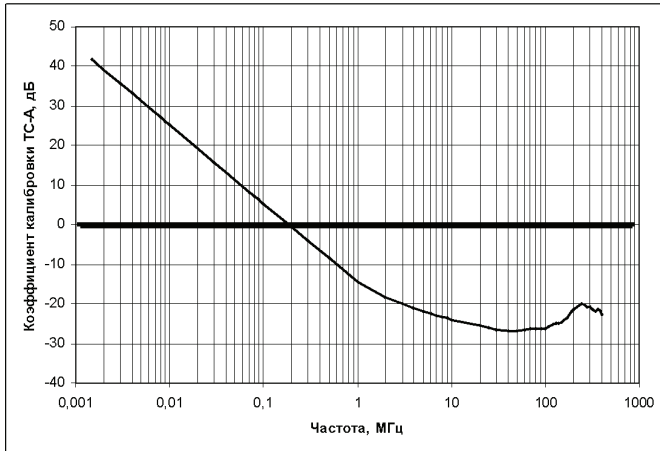


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента калибровки токосъемника ТС-А от частоты

Методика измерения ЭТРП. Измерение ЭТРП производится традиционным способом по следующей методике (рис. 11).

1. ИП-ТС одевается на проводник, отходящий от БАО (это или проводник электропитания, или линия связи по стандарту КТ-160D, или межблочные линии связи, включающие в себя все проводники, отходящие от БАО по стандарту ОСТ В1 02696-90).

2. К выходу ИП-ТС подключается измерительный приемник SMV-11 в диапазоне частот от 10 кГц до 30 МГц или SMV-8,5 в диапазоне частот от

3. 30 МГц до 100 МГц. В диапазоне частот от 1,5 кГц до 10 кГц применяется селективный нановольтметр Unipan 237.

4. Плавно перестраивая частоту измерительного приемника по его стрелочному прибору находим всплески ЭТРП при включенном БАО (при отключенном БАО выясняем это ЭТРП от БАО или это «фон»).

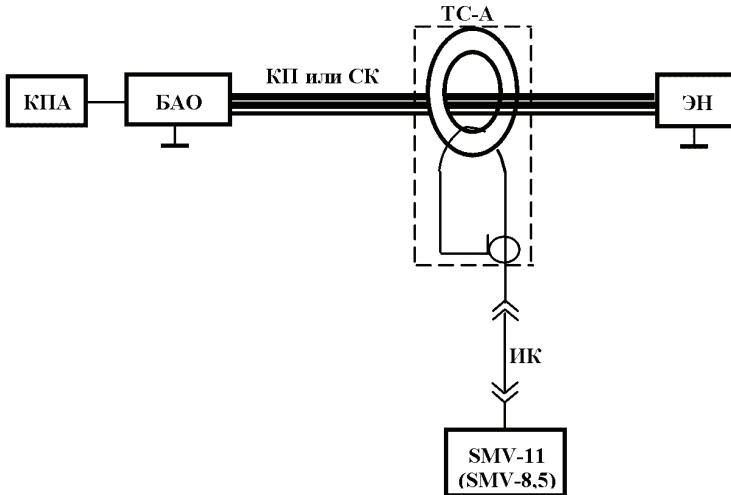
5. Результаты измерения всех всплесков заносим в протокол испытаний, после чего рассчитываем токи ЭТРП по формуле:

$$I_K(\text{дБ}) = U_{\text{ИП}}(\text{дБ}) + K_K(\text{дБ}). \quad (10)$$

6. Полученные результаты сравниваем с нормами по рис. 1 – 4 (в зависимости от вида БАО) и отмечаем все частоты, на которых эти нормы пре-

вышаются.

С недавнего времени в ИЛ НИПКИ «Молния» появился анализатор спектра FSL3, который позволяет автоматически перестраивать частоту измерения, и тем самым получать наглядную спектрограмму напряжения радиопомех с одновременным нанесением норм на радиопомехи на экране анализатора спектра. Курсорами анализатора можно определить в численном выражении как частоты, так и величины напряжений, превышающих нормы.



ЭН – эквивалент нагрузки;

КП – кабель питания БАО;

СК – соединительный кабель БАО;

ТС-А – токосъемник;

SMV-11 и SMV-8,5 – селективные микровольтметры;

КПА – контрольно-проверочная аппаратура

Рисунок 11 – Схема измерения тока радиопомех, создаваемого БАО в цепях электропитания и соединительном кабеле

Обычно в мировой практике анализатор спектра применяется совместно с эквивалентом сети для измерения эмиссии напряжения радиопомех. Это объясняется тем, что коэффициент калибровки эквивалента сети величина постоянная, не зависящая от частоты измерения. Поэтому для получения реальной картины достаточно из норм на эмиссию напряжения радиопомех вычесть этот коэффициент и сравнить полученные значения с реальным напряжением (рис. 12).

Однако применить этот метод для измерения токов непросто, так как для ТС-А (рис. 10) коэффициент калибровки зависит от частоты и поэтому сложно вычесть его из норм на ЭТРП во всем частотном диапазоне. Тем не менее, в ИЛ НИПКИ «Молния» была проведена работа по использованию

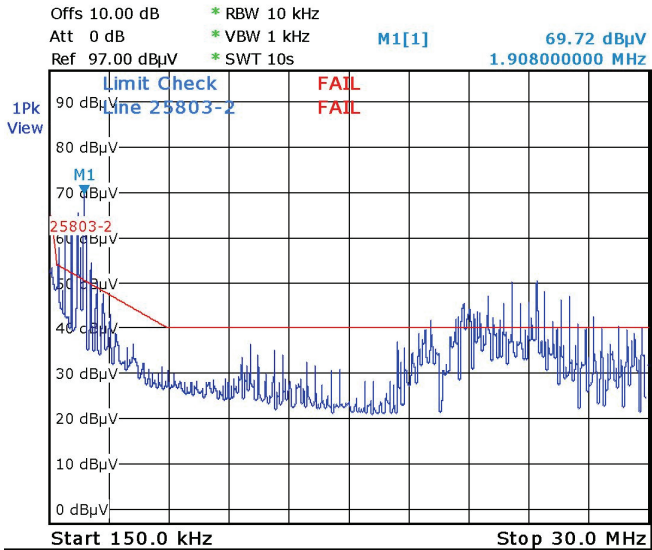


Рисунок 12 – Спектрограмма квазипиковых напряжений радиопомех в цепи электропитания



Рисунок 13 – Рабочее место при измерении эмиссии тока радиопомех

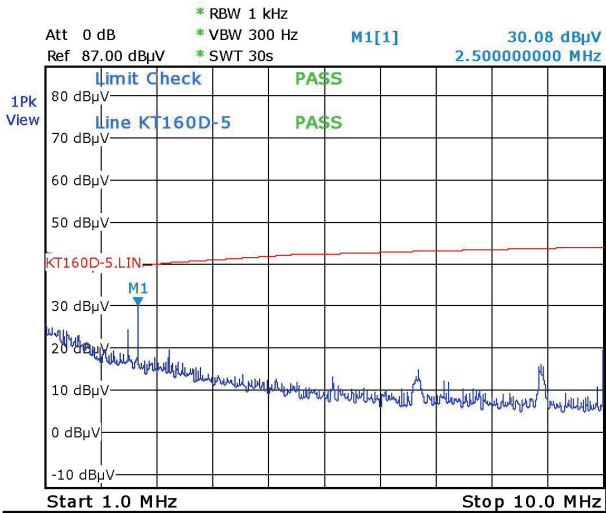


Рисунок 14 – Спектрограмма эмиссии тока радиопомех в линиях электропитания (изделие включено) в диапазоне частот от 1 до 10 МГц

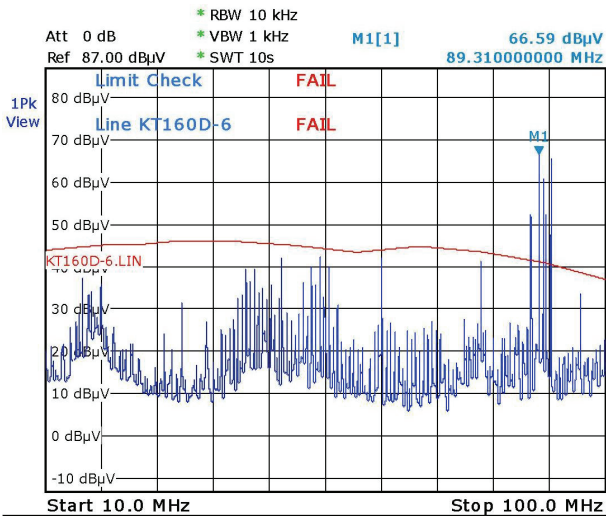


Рисунок 15 – Спектрограмма эмиссии тока радиопомех в линиях электропитания (изделие включено) в диапазоне частот от 10 до 100 МГц

анализатора спектра для измерения ЭТРП. Для этого были проделаны следующие работы:

- вместо норм ИТРП были получены нормы на напряжения с выхода ТС-А $U_{III}^{норм}(\delta Б)$ исходя из формулы:

$$U_{III}^{норм}(\delta Б) = I_{РП}^{норм}(\delta Б) - K_K(\delta Б), \quad (11)$$

где $I_{РП}^{норм}(\delta Б)$ – нормы на ЭТРП из рис. 2-4;

$K_K(\delta Б)$ – коэффициент калибровки ТС-А по рис. 10.

- весь диапазон частот измерения ЭТРП (10 кГц – 100 МГц) был разбит на 4 фрагмента (10 кГц – 100 кГц; 100 кГц – 1 МГц; 1 МГц – 10 МГц; – 10 МГц – 100 МГц), что позволило минимизировать нелинейность $U_{III}^{норм}(\delta Б)$ от частоты, а также увеличить точность измерения ЭТРП.

На рис. 13 приведено рабочее место измерения ЭТРП с применением анализатора спектра, а на рис. 14 - 15 приведены полученные по новому методу спектрограммы ЭТРП от одного из испытываемых БАО, которые позволили быстро и квалифицированно сделать заключение о соответствии БАО нормам на ЭТРП.

Выводы. Приведенные выше данные о методике автоматизированного измерения ЭТРП при помощи ТС-А позволяют сделать заключение о возможности реализации требований по измерению эмиссии токов радиопомех по всем действующим в Украине стандартам.

Список литературы: 1. ОСТ В1 02696-90 Оборудование бортовое. Общие требования на допустимые уровни создаваемых электромагнитных помех и методы их измерений. 2. Нормы ГКРЧ 11А-84 Общесоюзные нормы допускаемых промышленных радиопомех. Оборудование и объекты военного назначения. Нормы и методы испытаний. 3. КТ-160D Квалификационные требования. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. (Внешние воздействующие факторы - ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 21.0 Излучение радиочастотной энергии.

Bibliography (transliterated): 1. OST V1 02696-90 Oborudovanie bortovoe. Obshhie trebovanija na dopustimye urovni sozdavaemyh jelektromagnitnyh pomeh i metody ih izmerenij. 2. Normy GKRCb 11A-84 Obshhesojuznye normy dopuskaemyh industrial'nyh radiopomeh. Oborudovanie i ob#ekty voennogo naznachenija. Normy i metody ispytanij. 3. KT-160D Kvalifikacionnye trebovanija. Uslovija jekspluatacii i okružhajushhej sredy dlja bortovogo aviacionnogo oborudovanija. (Vnesh-nie vozdejsťvujushhie faktory - VVF). Trebovanija, normy i metody ispytanij. Razdel 21.0 Izlučenie radiočastotnoj jenergii.

Поступила (received) 11.03.2014

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»

ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ БАО НА ВОСПРИИМЧИВОСТЬ К ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ, ВЫЗВАННЫХ МОЛНИЕЙ («МНОГОКРАТНЫЕ УДАРЫ») ИГЛА-МКУ-2

Описана конструкция и результаты аттестации генератора, предназначенного для испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией «многократные удары», в соответствии с требованиями международных стандартов. Генератор производит циклограммы импульсов напряжения формы 2 по 5-ти уровням испытаний, испытания проводятся методом «кабельной инъекции».

Ключевые слова: испытание, бортовое оборудование, невосприимчивость, молния, переходные процессы, генератор, аттестация.

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

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

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

В данной статье мы рассмотрим испытания вида «многократные удары», реализуемые методом кабельной инъекции, при котором испытательные импульсы заданной формы и амплитуды индуцируются в проводниках МЛС

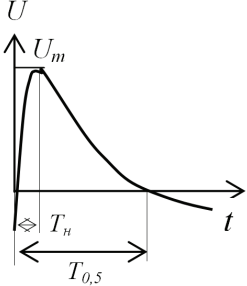
© Ю.С.Немченко, В.В.Князев, И.П.Лесной, С.Б.Сомхиев, 2014

при помощи инжекционного трансформатора. Этот метод используется для проверки способности самолетного оборудования выдерживать внутренние электромагнитные эффекты, создаваемые внешним воздействием молний без функциональных отказов и повреждений.

Идеологически схема формирования импульсов напряжения и тока требуемой формы приведена в [2].

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

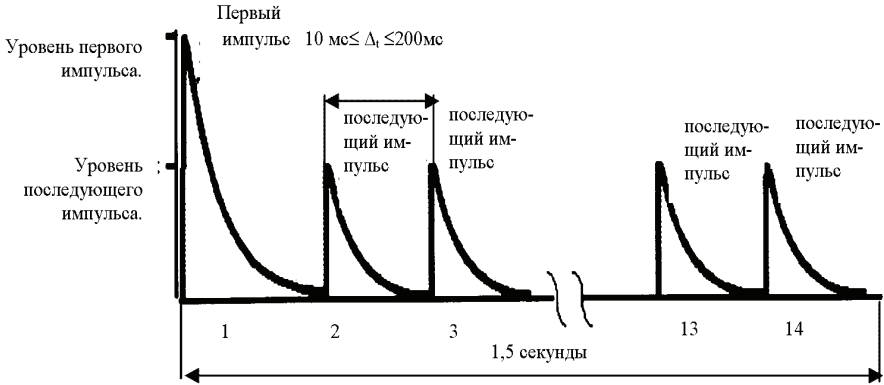
Таблица 1 – Требования к форме и АВП испытательных импульсов напряжения и тока

Параметр	Напряжение $U_{исн}$ (ф.2)	Ток $I_{прод}$ (ф.2)
1. Испытательный комплект № 2		Форма не нормирована
2. Уровни испытаний:		
– 1 (первый удар)	(50 + 10) В	$\leq (50 + 10)A$
– 1 (последующие удары)	(25 + 12,5) В	$\leq (25 + 12,5) A$
– 2 первый удар)	(125 + 25) В	$\leq (125 + 25) A$
– 2 (последующие удары)	(62,5 + 31,25) В	$\leq (62,5 + 31,25) A$
– 3 (первый удар)	(300 + 60) В	$\leq (300 + 60) A$
– 3 (последующие удары)	(150 + 75) В	$\leq (150 + 75) A$
– 4 (первый удар)	(750 + 150) В	$\leq (750 + 150) A$
– 4 (последующие удары)	(375 + 187,5) В	$\leq (375 + 187,5) A$
– 5 (первый удар)	(1600 + 320) В	$\leq (1600 + 320) A$
– 5 (последующие удары)	(800 + 400) В	$\leq (800 + 400) A$
3. Время нарастания, T_n , мкс	$\leq 0,1$	не нормировано
4. Время перехода через 0, T_0 , мкс	$6,4 \pm 1,28$	не нормировано

Генератор ИГЛА-МКУ-2 представляет собой высоковольтную электроразрядную установку с программируемым таймером-коммутатором, которая гене-

рирует многократные испытательные импульсы напряжений и тока положительной и отрицательной полярности по пяти уровням испытаний. Циклограмма вида «многократные удары» по RTCA-DO-160D приведена на рис. 1.

Общий вид генератора ИГЛА-МКУ-2 с ИТ-3 приведен на рис. 2, а передняя панель генератора – на рис. 3.



Один первый импульс сопровождается тринадцатью последующими импульсами, распределенными в интервале до 1,5 секунды

Временные параметры циклограммы:

количество испытательных импульсов в испытательном пакете $N_{BI} - 14$;

интервал между испытательными импульсами в испытательном пакете $T_{BI} -$ от 10 мс до 200 мс;

длительность испытательного пакета $T_{BII} -$ до 1,5 с;

количество испытательных пакетов $N_{III} -$ от 1 до 999.

Рисунок 1 – Циклограмма испытательного пакета вида «многократные удары» формы 2



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

Генератор ИГЛА-МКУ-2 собран в металлическом корпусе габаритами 480x550x210 мм. На передней панели генератора ИГЛА-МКУ-2 (рис. 3) расположены следующие органы управления и контроля:

- клавиша СЕТЬ с подсветкой служит для подачи напряжения питания 220 В 50 Гц на генератор ИГЛА-МКУ-2 и для его отключения после окончания работы;
- переключатель ИСПЫТ. УРОВЕНЬ служит для установления уровня испытательного напряжения генератора ИГЛА-МКУ-2 и имеет пять положений: «1», «2», «3», «4», «5»;
- переключатель ИНТЕРВАЛ, СЕК служит для установления временных интервалов в циклограмме между испытательными пакетами и имеет пять положений: «однократный», «10», «20», «40», «60»;
- табло КОЛИЧЕСТВО УДАРОВ служит для установления количества испытательных пакетов в заданной циклограмме многократных ударов;
- кнопка СТАРТ служит для запуска генератора ИГЛА-МКУ-2;
- кнопка УСТАН. для установления количества испытательных пакетов (для уменьшения этого количества - пользоваться кнопкой СБРОС);
- кнопка СБРОС служит для остановки генератора ИГЛА-МКУ-2 и сброса ранее установленного количества испытательных пакетов до нуля;
- светодиод ИНД. ИМП служит для фиксации каждого импульса в испытательном пакете.



Рисунок 3 – Передняя панель генератора ИГЛА-МКУ-2

На задней панели генератора ИГЛА-МКУ-2 расположены следующие органы управления и контроля:

- клемма \perp служит для подключения генератора ИГЛА-МКУ-2 к контуру заземления.
- разъем СЕТЬ (~ 220 В) служит для подключения к генератору ИГЛА-МКУ-2 сетевого кабеля;
- «6А» – предохранитель;
- РЕГУЛИРОВКА U_3 «МЕНЬШЕ» – «БОЛЬШЕ» служит для коррекции амплитуды испытательного напряжения при отличии напряжения сети от 220В;

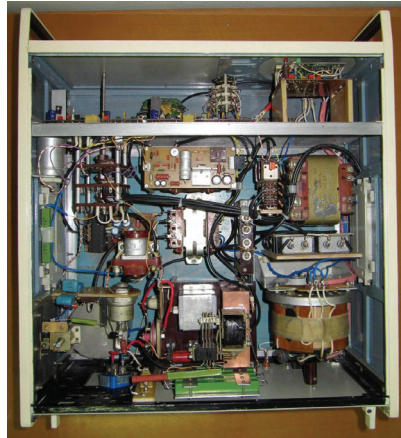
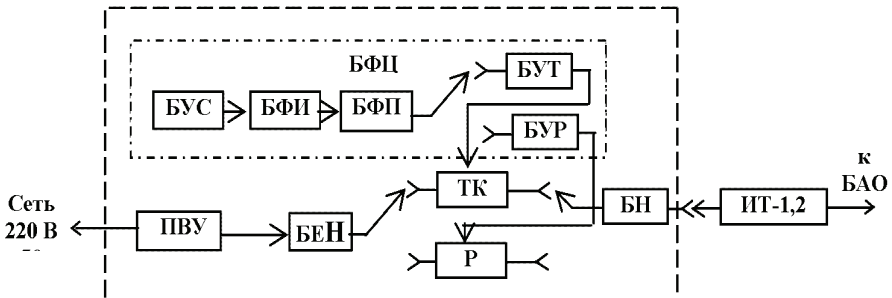


Рисунок 4 – Расположение элементов внутри корпуса генератора ИГЛА-МКУ-2

Генератор ИГЛА-МКУ-2



- БФЦ – блок формирования циклограммы испытательного импульса;
- БУС – блок управления и счетчик импульсов;
- БФИ – блок формирования интервалов между импульсами в пачке;
- БФП– блок формирования пачки из 14 импульсов;
- БУТ – блок управления тиристором;
- БУР – блок управления разрядником
- ПВУ – повысительно-выпрямительное устройство;
- БЕН – блок емкостного накопителя;
- ТК – тиристорный коммутатор;
- Р – высоковольтный разрядник;
- БН – блок нагрузок;
- ИТ-1,2– инжектирующий трансформатор;
- БАО – бортовое авиационное оборудование

Рисунок 5 – Блок-схема генератора ИГЛА-МКУ-2

– разъем Выход служит для подключения выхода генератора через кабель СК-1 к ИТ-1,2;

Расположение элементов внутри корпуса генератора ИГЛА-МКУ-2 приведено на рис. 4.

Блок-схема генератора ИГЛА-МКУ-2 приведена на рис. 5.

Результаты аттестации генератора. На рис. 6 приведены осциллограммы выходных импульсов напряжения первого удара формы «2» положительной и отрицательной полярностей для 5 уровня испытаний.

На рис. 7 приведена циклограмма испытательного пакета вида «многократные удары» из 14 ударов общей длительностью 1,3 с.

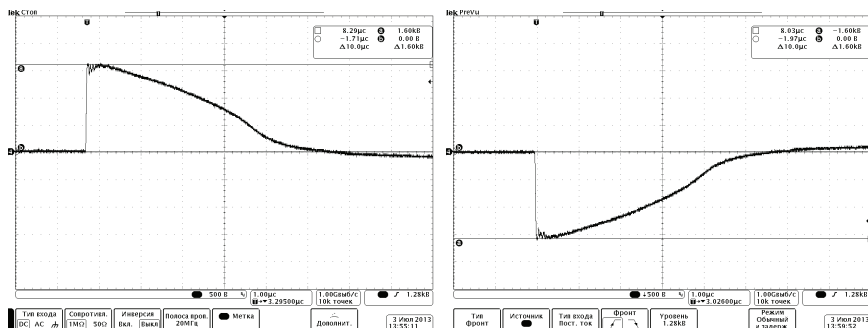


Рисунок 6 – Типовые осциллограммы выходных импульсов напряжения первого удара формы «2» 5 уровня положительной и отрицательной полярностей

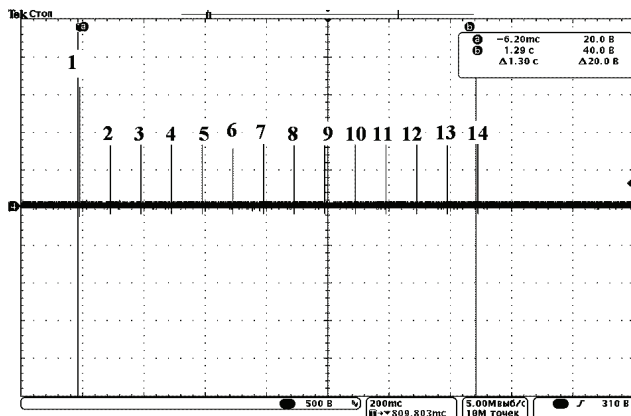
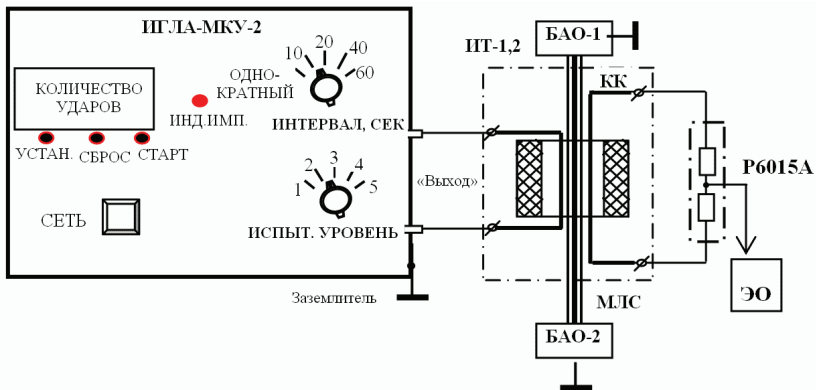


Рисунок 7 – Циклограмма испытательного пакета вида «многократные удары» из 14 ударов общей длительностью 1,3 с

Схема испытаний БАО с МЛС приведена на рис. 8.



ИГЛА-МКУ-2 – испытательный генератор;
 ИТ-1,2 – инжектирующий трансформатор;
 КК – калибровочный контур;
 P6015A – щуп высоковольтный P6015A 1000X;
 МЛС – межблочная линия связи;
 БАО-1, БАО-2 – испытываемое оборудование
 ЭО – осциллограф Tektronix TDS 1012

Рисунок 8 – Схема испытаний БАО

Выводы: Генератор ИГЛА-МКУ-2 успешно прошел первичную аттестацию с участием представителей ГП «Харьковстандартметрология» по разработанной в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» соответствующей программе и методике аттестации, введен эксплуатацию в НИО-2 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» и участвует в испытаниях БАО на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией методом «многократные удары».

Список литературы: 1. КТР-ВВФ /DO-160D/ED-14D/. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. (Внешние воздействующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 22.0 Восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией. 2. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («многократные удары») 2 формы ИГЛА-МКУ-2. Руководство по эксплуатации ИГЛА-МКУ-2.000.000.000 РЭ.

Bibliography (transliterated): 1. KTR-VVF DO-160DED-14D. Uslovija jekspluatacii i okruzhashhej srede dlja bortovogo aviacionnogo oborudovanija. (Vneshnie vozdejstvujushhie faktory – VVF). Trebovanija, nor-my i metody ispytanij. Razdel 22.0 Vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molnziej. 2. Generator dlja provenenija ispytanij bortovogo aviacionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molnziej («mnogokratnye udary») 2 formy IGLA-MKU-2. Rukovodstvo po jekspluatacii IGLA-MKU-2.000.000.000 RJe.

Поступила (received) 02.04.2014

А.А. ПЕТКОВ, д-р техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»

ВЕРОЯТНОСТЬ ПОЯВЛЕНИЯ ПОРАЖАЮЩЕГО РАЗРЯДА МОЛНИИ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ СТЕРЖНЕВОГО ОБЪЕКТА

В статье предложены соотношения для определения функции и плотности распределения радиус-вектора и угла проекций точек начала финальных разрядов молний, поражающих стержневые объекты.

Ключевые слова: разряд молнии, функция распределения, плотность распределения

Постановка проблемы. Молниезащита зданий и сооружений с использованием молниеотводов на сегодняшний день является одним из наиболее эффективных средств снижения потерь от грозовой деятельности. Этим фактом определяется непрерывное увеличение объема научных исследований, связанных с изучением поведения молнии вблизи различных объектов, в первую очередь, расположенных на поверхности грунта. Одним из наиболее распространенных типов объектов, подвергающихся воздействию разрядов молнии, являются стержневые объекты. Ввиду того, что стержневые объекты могут выступать как в качестве объектов защиты, так и в качестве средства защиты других объектов, изучению поражения их разрядом молнии уделяется особое внимание.

Анализ публикаций. Согласно нормативному документу [1], ожидаемое количество поражений сосредоточенных объектов стержневого типа (дымовые трубы, башни и т.п.) в течение года N определяется по следующей формуле:

$$N = 9 \cdot 10^{-6} \pi h_{\max}^2 n, \quad (1)$$

где h_{\max} – наибольшая высота объекта, м; n – плотность ударов молнии на 1 км^2 земной поверхности в течение года, определенная по данным метеорологических наблюдений в месте расположения объекта, $1/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$.

При отсутствии данных наблюдений плотность n может быть приближенно рассчитана по формуле

$$n = \frac{6,7T_{cp}}{100}, \quad 1/(\text{км}^2 \cdot \text{год}), \quad (2)$$

где T_{cp} – средняя продолжительность гроз в часах, определенная по картам интенсивности грозовой деятельности (для территории Украины составляет 40–100 час).

Ожидаемое количество поражений N , определенное по (1), основывается на том положении, что сосредоточенный объект (по аналогии с рассредоточенными объектами [1, 2]) «собирает» удары молнии с некоторого объема пространства («область захвата»), проекция которого на поверхность грунта представляет собой круг («круг стягивания») с центром на оси объекта и радиусом $3 h_{\max}$. Величина радиуса определена по результатам имитации молнии разрядом длинной искры на одиночный стержень [2].

Использование электрогеометрического метода расчета поражения объектов молнией дает значения количество поражений N отличные от значений, вычисляемых по (1). Это связано с тем, что радиус «круга стягивания» не постоянен и зависит от величины тока молнии, значение которого имеет статистический характер [3].

Как показывают результаты наблюдений поражения молнией стержневых объектов и моделирования молнии разрядом длинной искры [2, 2], не все разряды с проекцией начала финальной стадии разряда на «круг стягивания» поражают стержневой объект. Также вполне очевидно, что при прочих равных условиях финальные разряды молнии с проекцией, расположенной ближе к стержневому объекту, поражают его с большей вероятностью. Таким образом, ожидаемое количество поражений имеет вероятностный характер. Для установления вероятностного закона поражения стержневого объекта в первую очередь необходимо установить вероятность появления финального разряда молнии в точке, проекция которой попадает в «круг стягивания».

Приведенный анализ показывает, что проблема определения ожидаемого количества поражений объектов не может считаться окончательно решенной и требует дальнейших исследований.

Цель работы. Разработка описания вероятностных характеристик распределения проекций точек начала финальных разрядов молнии, поражающих стержневые объекты.

Результаты исследований. Источником данных для описания распределения проекций точек начала финальных разрядов молнии являются метеорологические наблюдения в месте расположения объектов, а именно, плотность ударов молнии на 1 км^2 земной поверхности в течение года. Использование этого показателя подразумевает, что на площади равной $1000 \times 1000 \text{ м}^2$ разряды молнии распределены равномерно вдоль декартовых координат. Для перехода к системе полярных координат с центром, совпадающим с осью стержневого объекта, рассмотрим вспомогательную задачу.

Пусть имеется система случайных величин (X, Y) равномерно распределенных в прямоугольнике Π со сторонами a и b , центр которого совпадает с началом координат, а стороны параллельны осям координат (рис. 1). Определим функцию распределения $F(x, y)$ системы случайных величин.

Площадь области распределения равна $S = ab$. Тогда плотность распределения случайной точки, определяемой системой случайных величин (X, Y)

определиваться как

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{ab}, & (x, y) \in \Pi; \\ 0, & (x, y) \notin \Pi. \end{cases} \quad (3)$$

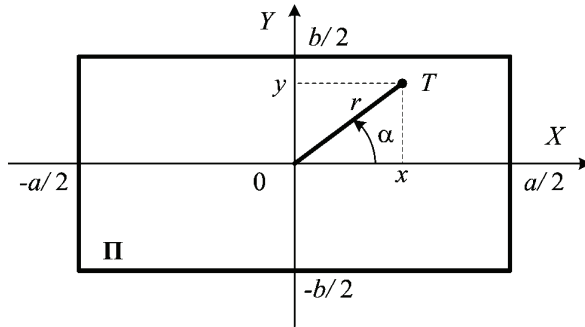


Рисунок 1 – Схема систем случайных величин

Функцию распределения определим по общему правилу исходя из следующей формулы [4]

$$F(x, y) = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y f(x, y) dx dy. \quad (4)$$

Для нашего варианта имеем

$$F(x, y) = \int_{-\frac{a}{2}}^x \int_{-\frac{b}{2}}^y \frac{dx dy}{ab} = \frac{1}{ab} \left(x + \frac{a}{2} \right) \left(y + \frac{b}{2} \right), \quad (x, y) \in \Pi. \quad (5)$$

Зная двумерную функцию распределения случайных декартовых координат точки T $F(x, y)$, вычисленную по выражению (5), можно определить плотность вероятности радиуса точки r (рис. 1). Для этого воспользуемся известным решением задачи для бесконечной плоскости и произвольной функции распределения декартовых координат $w(x, y)$, приведенным в [5]

$$W(r) = r \int_0^{2\pi} w(r \cos \alpha, r \sin \alpha) d\alpha. \quad (6)$$

Откуда для нашего варианта исходных данных, представленных выражением (5), в области, где r не зависит от α , плотность вероятности определится по выражению

$$W(r) = r \int_0^{2\pi} \frac{1}{ab} \left(r \cos \alpha + \frac{a}{2} \right) \left(r \sin \alpha + \frac{b}{2} \right) d\alpha = \frac{\pi r}{2}, \quad (7)$$

где диапазон изменения радиуса определяется как $0 < r < \text{MIN}(a/2, b/2)$.

Из (7) следует, что в указанных пределах изменения радиуса, его плотность вероятности не зависит от размеров прямоугольника a и b .

Полученное выражение (7) используем для решения основной задачи.

Пусть имеется стержень 1, расположенный на поверхности грунта Q , перпендикулярно этой поверхности (см. рис. 2). Из некоторой точки т. 1 пространства, прилегающего к стержню 1, развивается финальный разряд длинной искры, который может поразить стержень 1 или плоскость Q . Известно, что финальный разряд может поразить стержень 1 в том случае, если проекция точки т. 1 на плоскость Q (точка т. 2) попадает в круг радиусом R_{max} . Требуется определить функцию распределения радиуса точек, из которых финальный разряд может поразить стержень $F(r)$.

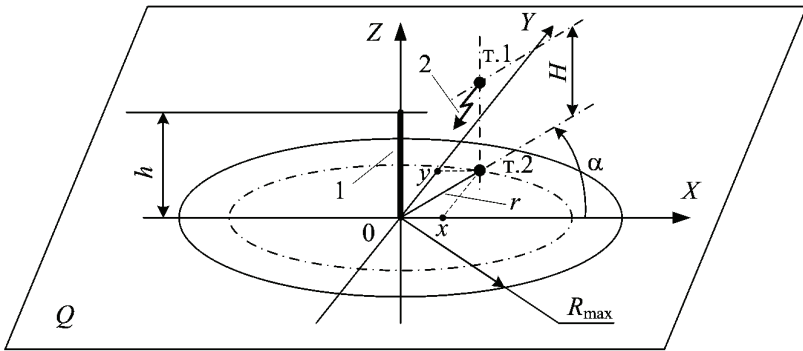


Рисунок 2 – Схема развития разряда

В нашем случае функция распределения представляет собой вероятность того, что проекция точки, с которой развивается финальный разряд, попадает в круг радиусом r (рис. 1). Используя (7) функция распределения определяется как

$$F(r) = \frac{\frac{\pi}{2} \int_0^r r dr}{\frac{\pi}{2} \int_0^{R_{\text{max}}} r dr} = \frac{r^2}{R_{\text{max}}^2}, \quad (8)$$

где $0 < R_{\text{max}} \leq \text{MIN}(a/2, b/2)$; $0 \leq r \leq R_{\text{max}}$.

Тогда плотность распределения радиус-вектора имеет вид

$$f(r) = \frac{dF(r)}{dr} = 2 \frac{r}{R_{\text{max}}^2}. \quad (9)$$

Таким образом, для максимального радиуса, значения которого не превышают половины наименьшей стороны прямоугольника, плотность и функ-

ция распределения r не зависят от размеров прямоугольника.

На рис. 3 и рис. 4 показаны графики функции и плотности распределения радиуса, построенные по соответствующим аналитическим выражениям – 1 и результаты имитационного моделирования – 2.

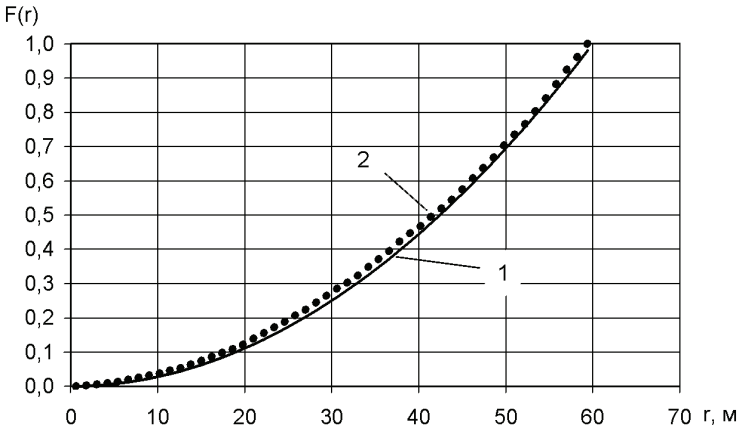


Рисунок 3 – Функция распределения радиуса

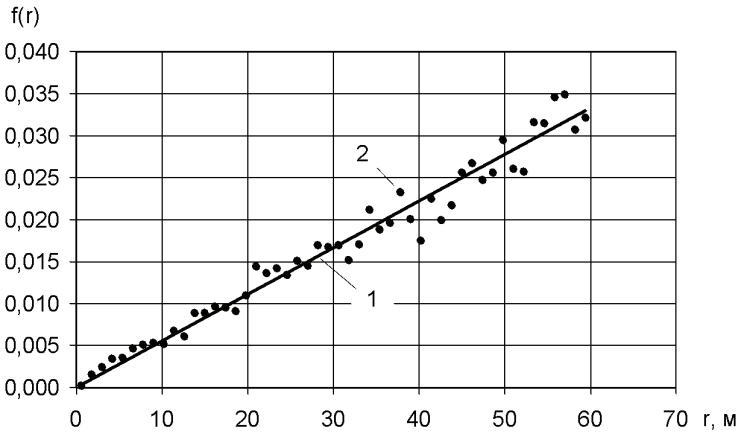


Рисунок 4 – Плотность распределения радиуса

Имитационное моделирование осуществлялось при следующих исходных данных: $a = 1000$ м, $b = 1000$ м; $R_{\max} = 60$ м. Для построения графиков использованы данные, полученные по результатам 7500 случайных реализаций.

Как видно из рис. 3 и рис. 4 расчеты по аналитическим моделям – 1 и результаты имитационного моделирования – 2 статистически совпадают.

Предварительный теоретический анализ и обработка результатов имитационного моделирования позволили представить функцию и плотность распределения угла α при $a = b$ в следующем виде

$$F(\alpha) = \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{1}{a^2\pi} A(1 - \cos \alpha); \quad (10)$$

$$f(\alpha) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{a^2\pi} A \sin \alpha, \quad (11)$$

где $A = (-0,0006r^3 + 0,1226r^2 - 8,5371r + 197,61)r^2$.

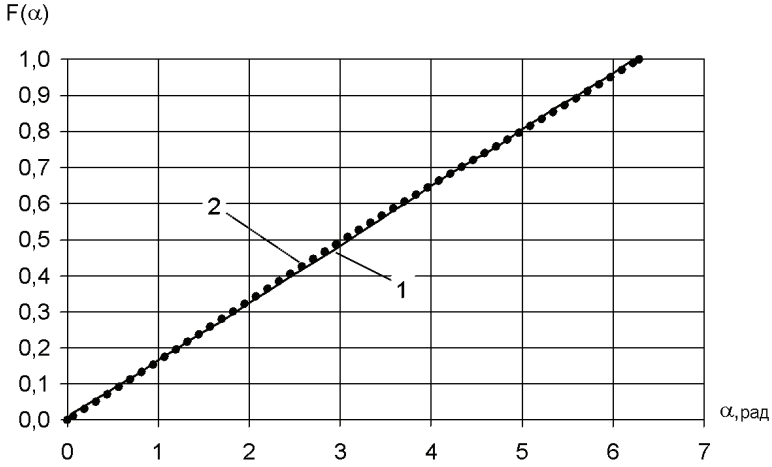


Рисунок 5 – Функция распределения угла α

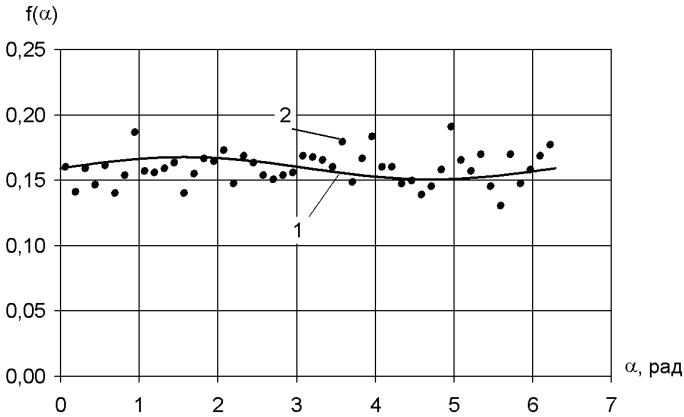


Рисунок 6 – Плотность распределения угла α

На рис. 5 и рис. 6 показаны графики функции и плотности распределения угла α , построенные по соответствующим аналитическим выражениям – 1 и результаты имитационного моделирования – 2. Имитационное моделирование осуществлялось при следующих исходных данных: $a = 1000$ м; $R_{\max} = 45$ м. Для построения графиков использованы данные, полученные по результатам 7500 случайных реализаций.

Как видно из рис. 5 и рис. 6 расчеты по аналитическим моделям – 1 и результаты имитационного моделирования – 2 статистически совпадают.

Таким образом, в работе, исходя из данных метеорологических наблюдений, получены соотношения для определения функции и плотности распределения радиус-вектора и угла проекций точек начала финальных разрядов молний, поражающих стержневые объекты.

Выводы

1. Получено аналитическое соотношение для определения функции распределения случайной точки, равномерно распределенной в прямоугольнике, центр которого совпадает с началом координат, а стороны параллельны осям координат.

2. Выведено соотношение для определения плотности распределения радиус-вектора случайной точки с декартовыми координатами, равномерно распределенными в прямоугольнике.

3. Получены соотношения для определения функции и плотности распределения радиус-вектора и угла проекций точек начала финальных разрядов молний, поражающих стержневые объекты.

Материалы статьи могут быть использованы для усовершенствования статистического описания процесса поражения стержневых объектов.

Список литературы: 1. Улаштування блискавкозахисту будівель споруд (IEC 62305:2006, NEQ): ДСТУ В В.2.5-38:2008. – [Чинний від 2008–01–01]. – К.: Мінірегіонбуд України, 2008. – 63 с. 2. Ларионов В.П. Основы молниезащиты / Ларионов В.П. : под ред. И.М. Бортника. – М.: Знак, 1999. – 104 с. 3. Базеля Э.М. Физика молнии и молниезащиты / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с. 4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 2000.— 480 с. 5. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

Bibliography (transliterated): 1. Ulashtuvannya blyskavkozakhystu budivel'i sporud (IEC 62305:2006, NEQ): DSTU В В.2.5-38:2008. – [Chynnyj vid 2008–01–01]. – К.: Minorehionbud Ukrainy, 2008. – 63. 2. Lariyonov V.P. Osnovy molniezaschity Lariyonov V.P. : pod red. I.M. Bortnika. – М.: Znak, 1999. – 104. 3. Bazelya E.M. Fizika molnii i molniezaschity E.M. Bazelyan, Yu.P. Rajzer. – М.: Fizmatlit, 2001. – 320. 4. Ventcel' E.S. Teoriya veroyatnostej i ee inzhenernye prilozheniya E.S. Ventcel', L.A. Ovcharov. – М.: Vyssh. shk., 2000.— 480. 5. Levin B. R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki B. R. Levin. – М.: Radio i svyaz', 1989. – 656.

Поступила (received) 02.04.2014.

И.А.ПОСТЕЛЬНИК, инженер НТУ «ХПИ»

ИЗМЕРЕНИЕ S-ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО СВЧ ТРАКТА НА ПРИНЦИПЕ ИМПУЛЬСНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Описаны характерные особенности метода исследования СВЧ цепей с помощью S-параметров. Приведены примеры измерения и определения характера цепи на основе импульсной рефлектометрии. С помощью измерителя неоднородностей линий проведен анализ входной цепи волоконно-оптического СВЧ тракта на базе передатчика/приемника AFBR-1310Z/AFBR-2310. Определена частотная зависимость коэффициента передачи тракта.

Ключевые слова: СВЧ, волоконно-оптический тракт, S-параметры, импульсная рефлектометрия, коэффициент передачи.

1. Введение

Для проведения испытаний соответствия уровня устойчивости бортового оборудования (БО) летательных аппаратов к действию высоко интенсивных радиочастотных электромагнитных полей (HIRF) зачастую необходимо экспериментально определить уровень экранирующих свойств корпуса БО. Высокая достоверность измерения экранирующих свойств обеспечивается с использованием оптических линий передачи информации. Экранирующие свойства корпуса БО минимальны в диапазоне его основных резонансных частот, которые лежат в диапазоне от 300 МГц до 3000 МГц. Создание достаточно чувствительного датчика электрического поля с оптической линией передачи информации является важной практической задачей, поставленной в рамках подготовки нашей испытательной лаборатории к аккредитации.

Проектирование модели СВЧ приборов, как правило, затруднено из-за отсутствия всей необходимой информации о параметрах комплектующих изделий. Существует несколько путей преодоления указанных трудностей. Один из них заключается в полном отказе от физических (структурных) моделей и описании СВЧ приборов на основании их внешних характеристик как четырехполюсников. Такие бесструктурные модели являются достаточно точными, в частности, потому, что они получены непосредственным измерением параметров готового прибора и автоматически учитывают все взаимосвязи в нем. Они более точны и потому, что их параметры измерены в том частотном диапазоне, для которого предназначен исследуемый прибор, физическая модель, какой бы сложной она не была – всегда *приближение*. Однако знание параметров моделей СВЧ приборов как четырехполюсников на одной частоте не несет информации об их поведении на смежных частотах. Поэтому необходимо большое число измерений в разных точках частотного диапазона. Недостатком этого пути является и потеря наглядности, так как

© И.А.Постельник, 2014

отказавшись от попыток заглянуть внутрь «черного ящика», труднее понять общие закономерности его поведения и развить расчетные методы, обладающие достаточной общностью.

2. Метод описания СВЧ тракта с помощью S-параметров

Более наглядные СВЧ модели основаны на оценке возмущений, возникающих при включении четырехполюсника в разрыв бесконечно длинной (или согласованной на своих концах) передающей линии и распространяющихся в ней в виде бегущих волн (рис. 1). Одна из систем параметров, основанная на такого рода эффекте, – система параметров матрицы рассеяния или система s-параметров нашла широкое распространение для описания СВЧ-устройств и приборов.

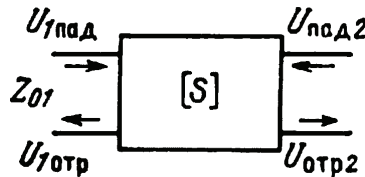


Рисунок 1 – Четырехполюсник в линии с согласованными нагрузками

Системы бегущих волн (напряжения или тока), к которым относится, и система параметров матрицы рассеяния, хорошо подходят для описания процессов в линиях с согласованными нагрузками.

Система S-параметров, введенная впервые в [2], является расчетной, то есть системой, параметры которой не могут быть измерены непосредственно. Эти параметры, описывают взаимосвязь падающих и отраженных волн мощности, и являются универсальными, то есть справедливыми как для вещественных, так и комплексных нагрузок. S-параметры позволяют найти, в частности, мощностные соотношения в устройствах каскадно соединенных с согласующими эти устройства четырехполюсниками, не прибегая к перемножению их матриц передач.

Нормировка в случае S-матриц осуществляется к действительной части комплексных сопротивлений генератора и нагрузки.

«S» происходит от слова «Scattering» (англ. рассеяния). Тестовые устройства могут быть: коаксиальные кабели, пассивные антенны, активные усилители, микроволновые фильтры и т.п. S-параметры имеют модуль коэффициента передачи / отражения (dB) и фазу (градусы) Принятое обозначение: S <выход> <вход>. Например, S21: передача от порта 1 в порт 2. Для измерения S-параметров используют векторные анализаторы и импульсные рефлектометры.

3. Принцип импульсной рефлектометрии

Импульсная рефлектометрия – это измерение отражения приложенного

импульсного сигнала во временной области. Импульсная рефлектометрия используется для выявления неоднородности волнового сопротивления и описание его характера. Измерение на этом принципе может быть использовано для:

- исследования коаксиальных и полосковых линий СВЧ-диапазона;
- контроля и регулировки согласующих широкополосных устройств;
- измерения параметров дискретных элементов, включенных в линию передачи (R, L, C);
- определения волнового сопротивления;
- оценки частотной характеристики затухания в линиях передачи;
- измерения переходных характеристик линий и устройств распределенного типа.

На рис. 2 изображена структурная схема работы импульсного рефлектометра (ИР). Импульсный генератор излучает в линию импульс возмущения (стимулятор). Отраженное напряжение от тестируемого устройства (ТЕСУ) измеряются ВЧ осциллографом на совпадение напряжения тестирования. С помощью формы измеренного отраженного сигнала изображенной на рис. 3-7 можно определить характер цепи и расположение неоднородностей.

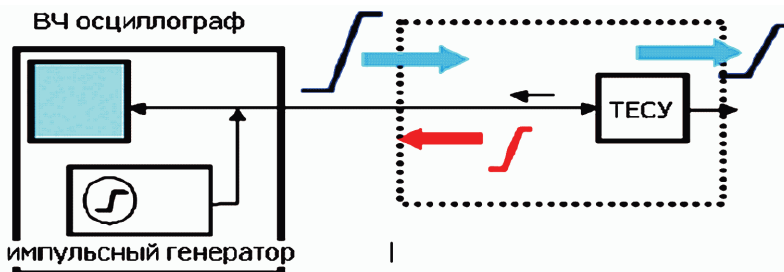


Рисунок 2 – Структурная схема измерения на принципе ИР

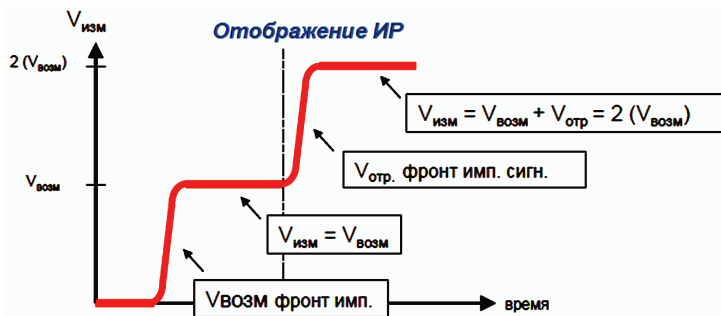


Рисунок 3 – Форма отраженного импульса при разомкнутой линии ($Z_H \rightarrow \infty$)

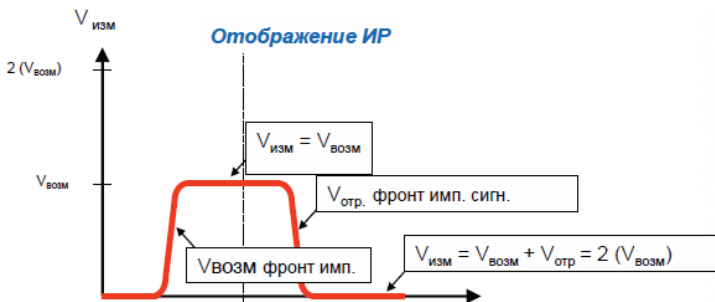


Рисунок 4 – Форма отраженного импульса при коротком замыкании ($Z_n = 0$)

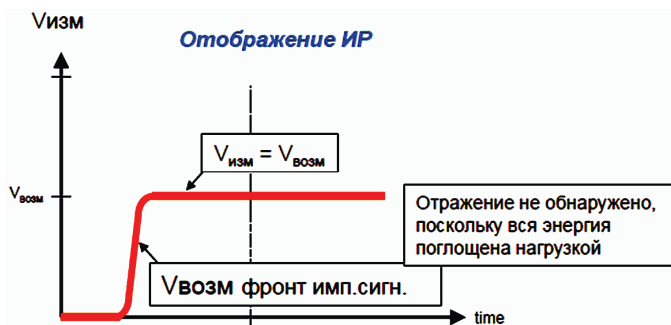


Рисунок 5 – Форма отраженного импульса при согласованной нагрузке ($Z_n = Z_0$)

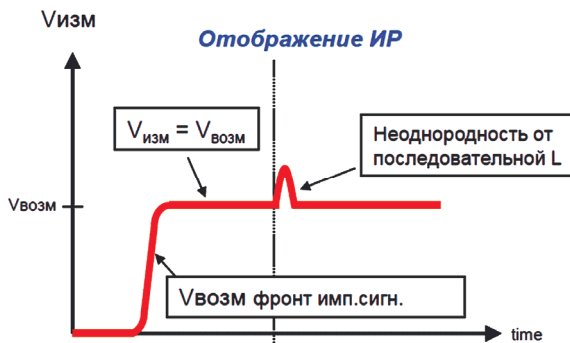


Рисунок 6 – Форма отраженного импульса при индуктивной нагрузке

4. Результаты измерений параметров входной цепи оптического тракта

Компанией Avago Technologies [3] выпущен компактный волоконно-оптический (ВО) передатчик AFBR-1310Z [4] (рис. 8) для работы в диапазоне от 200 MHz до 5.5 GHz на длине волны 1310 нм. Устройство предназначено для передачи аналоговых сигналов по одномодовому волокну, имеет оптиче-

ский интерфейс в виде пигтейла с коннектором FC/PC и включает в себя линейный широкополосный лазер Фабри-Перро на кристалле InGaAsAl/InP, фотодиод, который обеспечивает мониторинг и обратную связь. ВЧ усилитель с импедансом 50 Ом и контур смещения, позволяющий отдельно контролировать среднюю выходную мощность лазера. ВЧ вход связан по переменному току и не требует дополнительного блокирования постоянной составляющей. Высокая выходная мощность позволяет использовать лазер в пассивных оптических сетях с высоким коэффициентом деления.

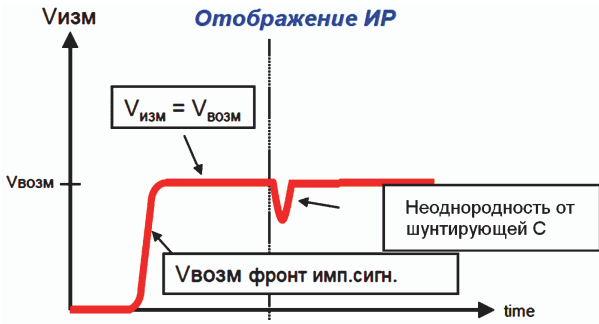


Рисунок 7 – Форма отраженного импульса при емкостной нагрузке



Рисунок 8 – Волоконно-оптический передатчик AFBR-1310Z

А также доступна ответная часть ВО СВЧ-тракта приемник AFBR-2310 [5] (рис. 9).

Приемник имеет широкую полосу пропускания, низкий темновой ток InGaAs/InP PIN фотодиода, который упакован внутри корпуса ТО. Вместе с интегрированным маломощным, высокопроизводительным E-pHEMT ВЧ усилителем, приемник имеет высокую чувствительность, что позволяет использовать его в пассивных оптических сетях.



Рисунок 9 – Волоконно-оптический приемник AFBR-2310

Задача состояла в исследовании входной цепи передатчика, определении характера и наличия неоднородностей. Данное исследование производилось с помощью импульсного рефлектометра «Измерителя неоднородностей линий P5-15». Описание принципа действия, настройки и параметры данного прибора изложено в [6].

При измерении входной цепи были получены следующие рефлектограммы отраженного сигнала (рис. 10-11).

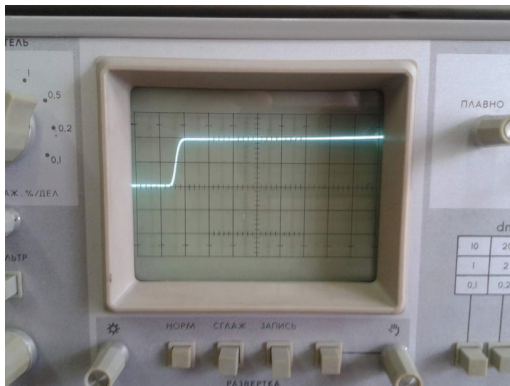


Рисунок 10 – Форма отраженного импульса при разомкнутой линии

На рис. 11, форма отраженного импульса указывает о наличии неоднородности входной цепи приемника. Для подключения импульсного генератора к входу оптического приемника используется стандартная система, параметры которой измерены в линии со стандартным характеристическим сопротивлением 50 Ом. Следовательно, входное активное сопротивление оптического приемника AFBR-1310Z отличается от 50 Ом. Этот факт был учтен при создании измерительного тракта, что позволило существенно улучшить его передаточную характеристику.

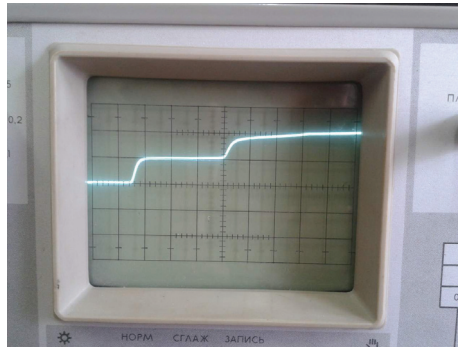


Рисунок 11 – Форма отраженного импульса при подключении входной цепи оптического передатчика

5. Коэффициент передачи тракта (Параметр S12)

Исследование коэффициента передачи тракта осуществлено с использованием высокочастотного генератора Agilent и цифрового осциллографа ТЕКТРОНИХ DPO 4104. Результаты исследований для усредненного коэффициента передачи представлены на рис. 12 в диапазоне частот от 200 МГц до 1000 МГц.

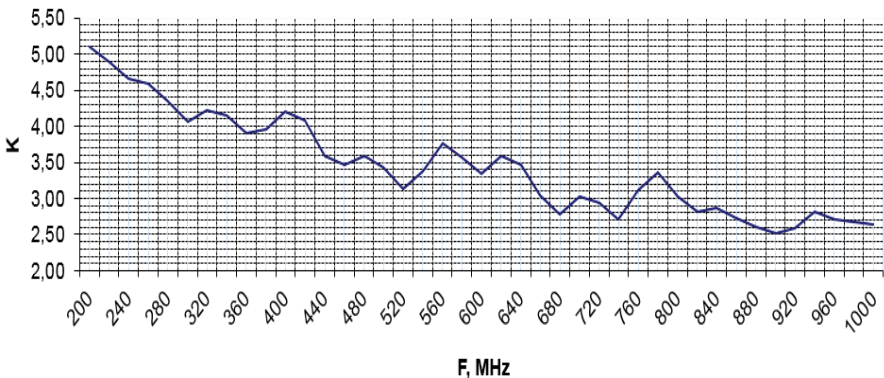


Рисунок 12 – Зависимость коэффициента передачи от частоты

На рис. 13 показан коэффициент передачи для разных входных напряжений в диапазоне от 30 до 90 мВ (кривые снизу-вверх). Это означает что на вход измерительного тракта можно подавать сигнал с изменением амплитуды в три раза. Собственные шумы оптического тракта находятся на уровне 10мВ. Это связано с наличием внутреннего «темного» тока PIN-фотодиода в оптическом приемнике. Поэтому при передаче сигнала амплитудой ниже 30мВ, полезный сигнал теряется в собственных шумах измерительного тракта. При подаче сигнала амплитудой выше 90 мВ коэффициент передачи дос-

тигает точки компрессии (отклонение линейности амплитудной характеристики на 1дБ). Это происходит из-за проявления нелинейности устройства.

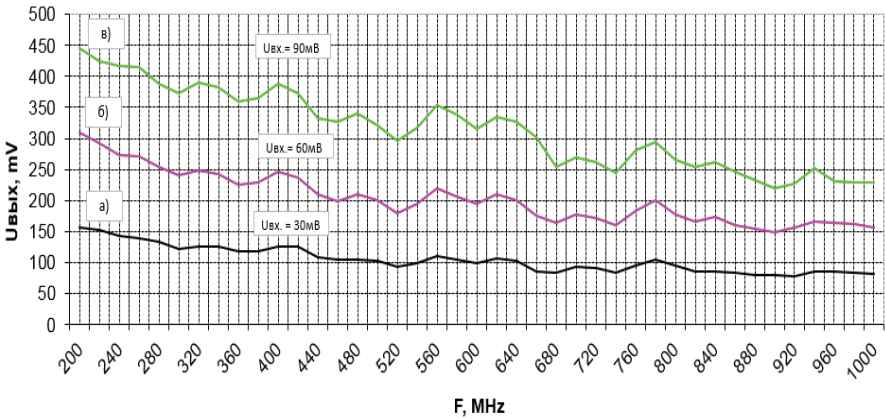


Рисунок 13 – Коэффициент передачи при U_{вх.}: а) 30мВ, б) 60мВ, в) 90мВ

5. Выводы

Полученные результаты на основе измерений импульсной рефлектометрии позволили определить характер неоднородности линии. По форме отраженного импульса установлено, что входная цепь оптического приемника ведет себя как разомкнутая линия, сопротивление нагрузки которой стремится к бесконечности ($Z_{н} \rightarrow \infty$).

Создан макет измерительного тракта и определен коэффициент его передачи в диапазоне частот от 200 МГц до 1000 МГц. Во указанном диапазоне частот коэффициент передачи характеризуется усилением сигнала от 2,5 до 5 раз. Эти результаты будет положено в основу датчика электрического поля.

Список литературы: 1. *Н.З. Шварц / Усилители СВЧ на полевых транзисторах.* – М.: Радио и связь, 1987. – 200 с. 2. *K.Kurokawa Power Waves and the Scattering Matrix // IEEE Trans., 1965.* – 194 с. 3. <http://www.avagotech.com/pages/home> 4. Data Sheet – AFBR-1310Z, Fiber Optic Transmitter for Multi GHz Analog Links. 5. Data Sheet - AFBR-2310Z, Fiber Optic Receiver for Multi GHz Analog Links. 6. Техническое описание и инструкция по эксплуатации P5-15, 1989. – 179 с.

Bibliography (transliterated): 1. N.Z. Shvarc Usiliteli SVCh na polevyh tranzistorah. – M.: Radio i svjaz', 1987. – 200. 2. K.Kurokawa Power Waves and the Scattering Matrix IEEE Trans., 1965. – 194. 3. <http://www.avagotech.com/pages/home> 4. Data Sheet – AFBR-1310Z, Fiber Optic Transmitter for Multi GHz Analog Links. 5. Data Sheet - AFBR-2310Z, Fiber Optic Receiver for Multi GHz Analog Links. 6. Tehnicheskoe opisanie i instrukcija po ekspluatcii R5-15, 1989. – 179.

Надійшла (received) 17.03.2014

О.Н. СИЗОНЕНКО, д-р техн. наук, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
В.В. ЛИТВИНОВ, мл. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев;
С.В. КОНОТОП, инженер 2 кат., ИИПТ НАН Украины, Николаев;
А.А. КОВАЛЕНКО, инженер, ИИПТ НАН Украины, Николаев

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ИСКРОПЛАЗМЕННОМ СПЕКАНИИ ДИСПЕРСНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

В данной работе с помощью графической среды программирования LabVIEW разработана программа автоматизации процесса измерения параметров (температуры, тока и напряжения) искроплазменного спекания дисперсных композиций, выполнено ее тестирование и проведена апробация в условиях реального эксперимента. Установлено, что программа позволяет отслеживать ход процесса спекания в режиме реального времени для его контроля и, по необходимости, корректировки, а также снижает трудоемкость процесса измерения.

Ключевые слова: искроплазменное спекание, среда разработки, алгоритм, программа, температура, ток, напряжение

Введение. В настоящее время все большую значимость получают работы, направленные на разработку новых способов получения материалов с улучшенными физическими и функциональными свойствами. Одним из наиболее перспективных методов является искроплазменное спекание (ИПС) дисперсных композиций [1, 2]. В Институте импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины разработана экспериментальная установка нового поколения для ИПС [3]. Для обеспечения качественного и эффективного искроплазменного спекания необходимо одновременно отслеживать несколько параметров, оказывающих влияние на данный процесс: температуру, напряжение и ток. В разработанном устройстве регистрация перечисленных параметров осуществлялась вручную, что не позволяло управлять процессом ИПС. Первым шагом в создании сложной системы управления силовым электрическим сигналом является автоматизация процесса. Это позволит не только повысить точность, но и уменьшить трудоемкость выполняемой работы. Поэтому автоматизация процесса измерения температуры, тока и напряжения при ИПС дисперсных композиций является актуальной задачей.

В связи с этим целью данной работы было – автоматизировать процесс измерения температуры и электрических характеристик при ИПС дисперсных композиций.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

© О.Н. Сизоненко, В.В. Литвинов, С.В. Конотоп, А.А. Коваленко, 2014

а) выбрать среду разработки программного продукта для автоматизации процесса измерения температуры, тока и напряжения при ИПС дисперсных композиций;

б) разработать алгоритм программы автоматизации процесса измерения температуры, тока и напряжения при ИПС дисперсных композиций;

в) выполнить тестирование и настройку программы;

г) провести измерение параметров ИПС дисперсных композиций с помощью программы автоматизации процесса измерения температуры, тока и напряжения.

Выбор среды разработки. Первым этапом автоматизации процесса измерения параметров, является выбор среды разработки программного продукта.

В настоящее время существует множество сред разработки. В связи с тем, что они предназначены выполнять одинаковые задачи, для дальнейшего выбора стоит выделить их недостатки, приведенные в табл. 1 [4-11].

Таблица 1 – Недостатки сред разработки для сбора и обработки данных

Среда разработки, производитель	Недостатки
LabVIEW, National Instruments	Перенос откомпилированной программы на другой компьютер осуществляется совместно с установкой National Instruments LabVIEW 6.1 (или более поздней версии), что увеличивает объем программы
HP VEE, Hewlett-Packard	Отсутствие собственных библиотечных функций для работы с портами ПК.
SoftWIRE, ComputerBoards	Обязательное условие наличия Visual Basic не ниже 6 версии. Для сложных задач потребует текстового программирования.
DASYLab, DATALOG GmbH	Конкретный набор модулей зависит от варианта поставки среды разработки.
ProfiLab-Expert, Abacom Electronics Software	Отсутствует переведенное на русский или украинский язык руководство по работе с приложением. Форум, в Интернете, на немецком языке.

LabVIEW от National Instruments [4] является старейшей (выпускается более 20 лет) и наиболее распространенной в мире системой графического программирования для сбора и обработки данных. В США для подобных задач этот пакет выбирает примерно каждый третий или четвертый потребитель. LabVIEW также хорошо известен и в других странах, кроме того – много литературы для русскоязычного населения.

National Instruments LabVIEW – это графическая среда разработки, предназначенная для решения задач измерения, обработки и отображения данных [4]. LabVIEW позволяет инженерам и ученым быстро разрабатывать собственные проекты с помощью дополнительных специализированных биб-

лиотек. В этой программе встроенная поддержка организации собственного ввода/вывода ограничена простой работой с портами ПК под Windows. Также имеются библиотечные функции, позволяющие использовать звуковую плату в качестве двухканальных АЦП и ЦАП под Windows. Стандартный интерфейс к внешним устройствам включает в себя работу с последовательными портами ПК. К тому же практически каждый заметный производитель техники для сбора и обработки данных предусматривает наличие соответствующих драйверов к LabVIEW [4].

С целью автономного исполнения проекта вне интегрированной среды, разработки и передачи его конечному потребителю приложение может быть оформлено в виде EXE файла. Для этого необходим дополнительный, отдельно поставляемый модуль Application Builder [4].

Выполненный анализ показывает, что среди перечисленных выше программных сред разработки на первое место среди потребителей по всему миру занимает National Instruments LabVIEW [6], так как представляет собой высокоэффективную среду графического программирования, в которой можно создавать гибкие и масштабируемые приложения измерений, управления и тестирования с минимальными временными и денежными затратами.

Так в сравнении с пакетом HP VEE среда разработки LabVIEW в выгодную сторону отличается – значительно больше возможности по обработке данных за счет обильного количества дополнительных прикладных пакетов под широкий круг задач. Кроме того, LabVIEW, в частности, в отличие от Advanced Analysis, имеется набор модулей для более специфической цифровой обработки сигналов (Signal Processing Toolset) и развитая система обработки изображений (IMAQ Vision и IMAQ Vision Builder) [4].

Кроме вышеупомянутых достоинств LabVIEW сочетает в себе гибкость традиционного языка программирования с интерактивной технологией Экспресс виртуальных приборов (ВП), которая включает в себя автоматическое создание кода, использование помощников при конфигурировании измерений, шаблоны приложений и настраиваемые Экспресс ВП. Благодаря этим особенностям и новички, и эксперты могут легко и быстро создавать приложения в LabVIEW [6].

Интуитивно понятный процесс графического программирования позволяет уделять больше внимания решению проблем, связанных с измерениями и управлением, а не программированию. LabVIEW предлагает:

- интуитивно понятный процесс графического создания приложений для измерений, управления и тестирования;
- полноценный язык программирования;
- встроенные средства для сбора данных, управления приборами, обработки результатов, генерации отчетов, передачи данных и др.;
- совместимость с разнообразными приборами благодаря наличию 2000 драйверов и возможности генерации кода интерактивным мастером;
- шаблоны приложений, тысячи примеров;
- высокую скорость выполнения откомпилированных программ;

– обучение и техническая поддержка мирового уровня LabVIEW может работать под управлением операционных систем Windows2000/NT/XP, Mac OS X, Linux и Solaris.

Приложения, написанные в LabVIEW, находят применение во всем мире в разнообразных отраслях промышленности: в автомобильной, телекоммуникационной, аэрокосмической и полупроводниковой промышленности, разработке и производстве электроники, управлении производством, биомедицине и многих других отраслях [4]. Благодаря своей гибкости и масштабируемости, LabVIEW может использоваться на всех этапах технологического процесса: от моделирования и разработки прототипов продуктов до широко-масштабных производственных испытаний. Применение интегрированной среды LabVIEW для измерения сигналов, обработки результатов и обмена данными помогает повысить производительность данного процесса.

Поэтому для решения задачи автоматизации процесса реализации измерения температуры, тока и напряжения при ИПС дисперсных композиций в качестве графической среды программирования была выбрана программа LabVIEW.

Разработка алгоритма программы для автоматизации процесса измерения температуры, тока и напряжения в процессе ИПС дисперсных композиций. Вторым этапом автоматизации процесса реализации измерения температуры, тока и напряжения в процессе ИПС дисперсных композиций являлось разработка алгоритма и написание программы. На рис. 1 приведена блок-схема алгоритма программы.

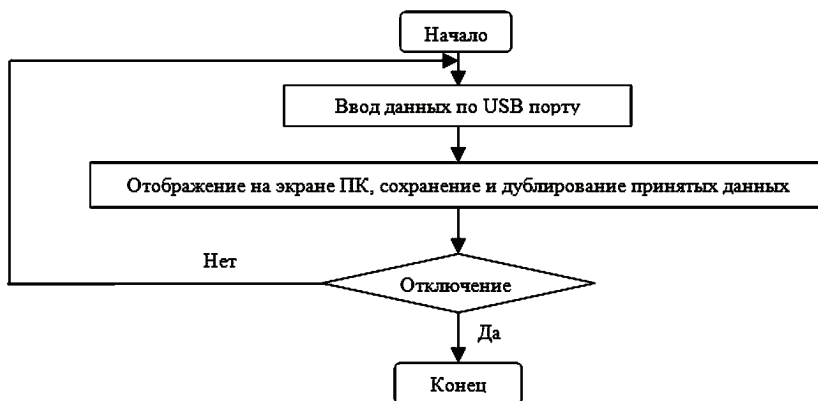


Рисунок 1 – Алгоритм программы ПК

Данные от всех датчиков поступают в преобразователь сигналов, после этого преобразователь сигналов, по USB интерфейсу, передает данные в ПК, происходит отображение на экране ПК в режиме реального времени и их со-

хранение на жестком диске (С:). Для повышения сохранности полученных данных и снижения фактора возможной человеческой ошибки выполняется дублирование данных на жестком диске (С:).

На рис. 2 представлено тело программы, на графическом языке программирования.

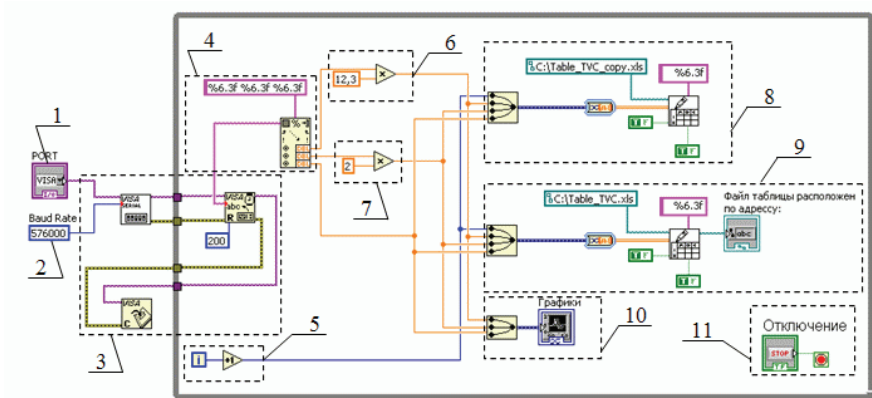


Рисунок 2 – Тело программы отображения, температуры, тока и напряжения, на экране ПК: 1 – модуль выбор порта приема данных, осуществляется пользователем; 2 – скорость передачи данных, в данном случае фиксировано 576000 бит/с; 3 – отвечает за прием данных программой; 4 – осуществляет сортировку данных, для дальнейшей их обработки; 5 – нумерует принятые данные; 6 – осуществляет масштабирование значения тока; 7 – осуществляет масштабирование значение напряжения; 8 – резервное сохранение данных; 9 – сохранение данных; 10 – отображение данные на экране ПК; 11 – отключает программу, по требованию пользователя

На рис. 3 представлен внешний вид готового программного продукта реализации измерения температуры, тока и напряжения в процессе ИПС дисперсных композиций.

При написании данного программного продукта была использована соответствующая литература [12].

Тестирование и настройка программы. В ходе тестирования программы были составлены таблицы для дальнейшей ее настройки.

Ток на экране ПК проверяли при помощи поверенных измерительных клещей Sanwa digital clamp meter DCM2000AD с погрешностью измерения 0,7% [13] и были получены данные, приведенные в табл. 2.

Таблице 2 – Тарировка значения тока в программе ПК

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I_0, A	271	352	400	450	500	550	600	650	700	740	810	870
$I_{пп}, A$	22	28	32	36	41	45	49	53	57	61	66	70

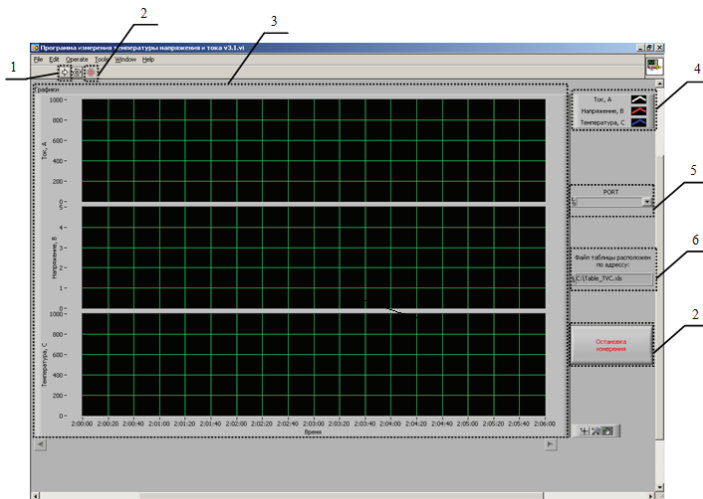


Рисунок 3 – Внешний вид программы измерения температуры, тока и напряжения: 1 – кнопка запуска программы; 2 – кнопка остановки программы; 3 – зона отображения принятых данных; 4 – легенда цветовой маркировки каждого графика; 5 – выбор порта приема данных, осуществляется пользователем; 6 – месторасположения и имя сохраненного файла

Среднее значение коэффициента отклонения по току, определяли по формуле 1:

$$k_I = \frac{\sum I_{\partial}}{I_{np}} \approx 12,3, \quad (1)$$

где I_{∂} – значение тока, измеренное поверенными измерительными клещами, А; I_{np} – проверяемое значение тока, на экране ПК, А; n – количество проведенных измерений.

Отсюда $I_{np}^* \approx I_{np} \cdot k_I$, где I_{np}^* – измеряемое значение тока, близкое к действительному.

После настройки программы были получены результаты, представленные на рис. 4.

Во время измерения тока относительная ошибка составила 2,2% [14].

Напряжение на экране ПК проверялось при помощи Digital multimeter MS8265 с погрешностью измерения 0,1 % [15], были получены данные, приведенные в табл. 3.

Таблица 3 – Тарировка значения напряжения в программе ПК

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
U_{∂} , В	0,4	0,52	0,6	0,69	0,74	0,78	0,83	0,89	0,96	1,2	1,6	2,2
U_{np} , В	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,8	1,1

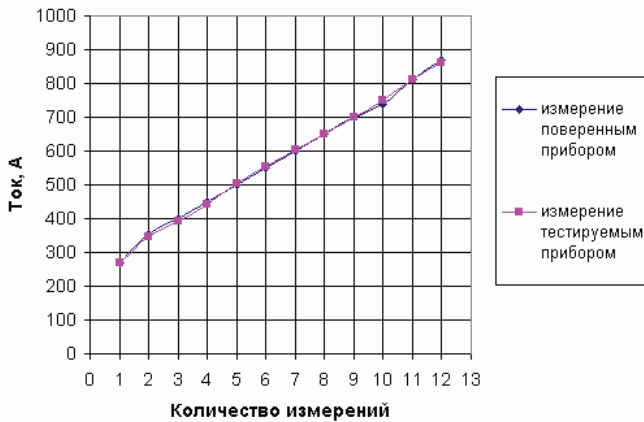


Рисунок 4 – Графики измерения значения тока протекающего через камеру спекания дисперсных композиций после тарировки: поверненным прибором и тестируемым прибором

Среднее значение коэффициента отклонения по напряжению, определяли по формуле 3.2:

$$k_U = \frac{\sum \frac{U_o}{U_{np}}}{n} \approx 2, \quad (2)$$

где U_o – значение напряжения, измеренное поверненным измерительным мультиметром, В; U_{np} – проверяемое значение напряжения, на экране ПК, В; n – количество проведенных измерений.

Отсюда $U_{np}^* \approx U_{np} \cdot k_U$, где U_{np}^* – измеряемое значение напряжения, близкое к действительному.

После настройки программы были получены следующие результаты, представленные на рис. 5.

Во время измерения напряжения относительная ошибка измерения составила 15,4 % [14].

Полученные результаты обусловлены добавлением в схему измерения напряжения – делителя напряжения с коэффициентом деления $\frac{1}{2}$. Данное добавление делителя предназначено для защиты АЦП системы измерения.

Температура на экране ПК проверялась при помощи СЕМ Dual laser targeting InfraRed & K-Type DT-8869H с погрешностью измерения 1,5% [16], были получены данные, приведенные в табл. 4.

Таблица 4 – Тарировка значения температуры в программе ПК

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$T_o, ^\circ\text{C}$	151	200	235	344	350	440	540	630	819	850	920	960
$T_{np}, ^\circ\text{C}$	150	199	234	343	350	440	540	629	818	850	920	960

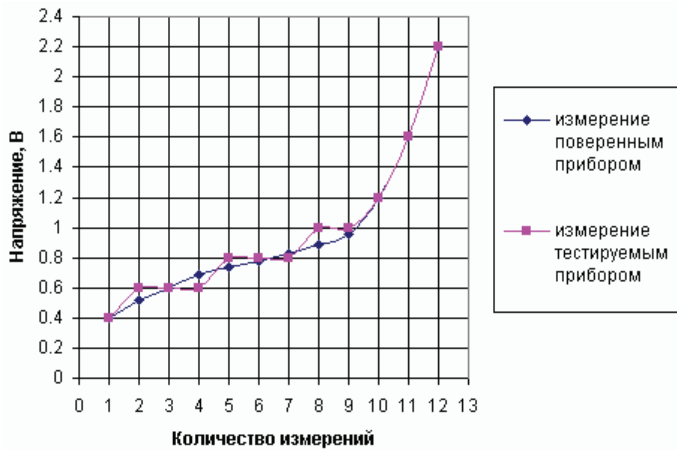


Рисунок 5 – Графики измерения значения напряжения на клеммах камеры спекания дисперсных композиций после тарировки: поверенным прибором и тестируемым прибором

После проверки программы были получены результаты, представленные на рис. 6.

Во время измерения температуры относительная ошибка измерения составила 0,7% [12]. В связи с тем, что во время проверки температуры были получены практически одинаковые результаты (см. рис. 6) – коэффициент отклонения по температуре составляет 1.



Рисунок 6 – Графики измерения значения температуры: поверенным прибором и тестируемым прибором.

Измерение параметров ИПС с помощью разработанного программного продукта. С помощью разработанной программы был выполнен

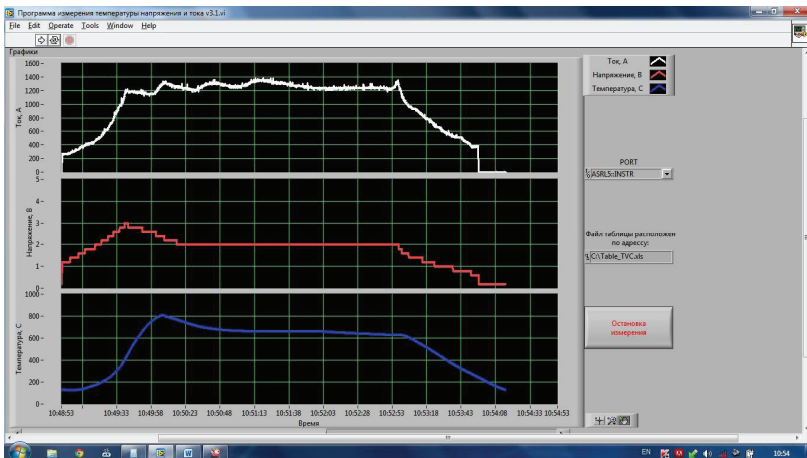


Рисунок 7 – Окно программы по завершении работы

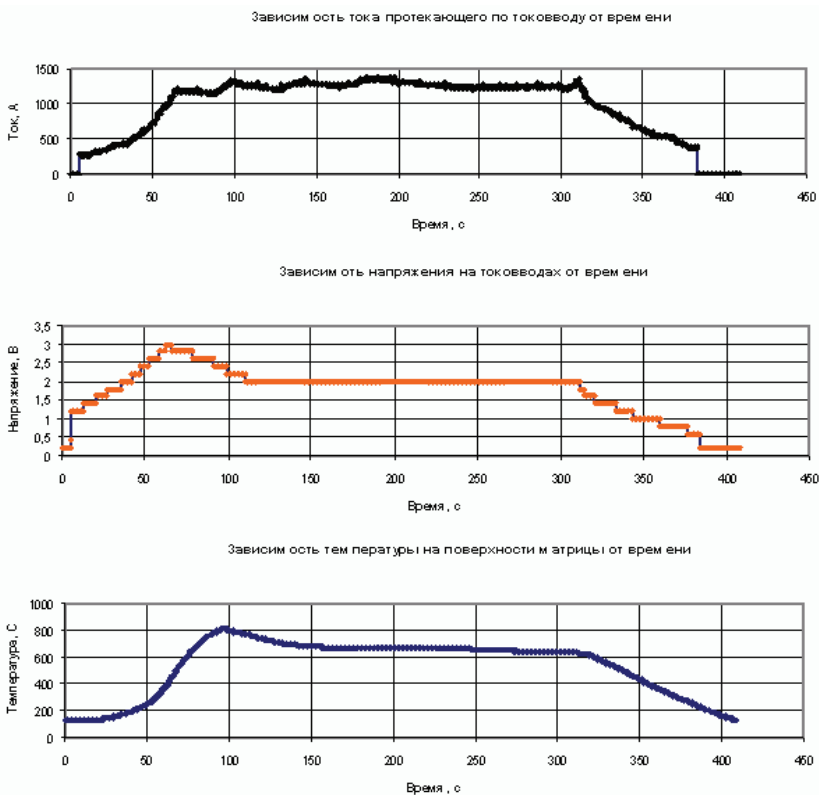


Рисунок 8 – Полученные графики из сохраненного файла

эксперимент по ИПС дисперсных композиций. Окно программы по окончании работы ИПС порошка состава представлено на рис. 7.

На рис. 8 представлены графики, полученные из таблиц, сохраненных после окончания работы.

В данный момент программное обеспечение успешно применяется при проведении экспериментов по ИПС дисперсных композиций, внешний вид комплекса ИПС представлен на рис. 9.

К достоинству программы можно отнести – отслеживание процесса спекания образца в реальном времени с шагом 1/16 секунды, что позволяет контролировать ход процесса и при необходимости выполнить его корректировку.



Рисунок 9 – Внешний вид комплекса ИПС: 1 – «Гефест-10»; 2 – камера для спекания дисперсных композиций; 3 – устройство измерения температуры, тока и напряжения, для последующей передачи данных на ПК; 4 – ПК с программой измерения температуры, тока и напряжения

Выводы: 1. С использованием среды программирования LabVIEW разработана программа, которая позволяет автоматизировать процесс измерений температуры, напряжения и тока процесса ИПС дисперсных композиций.

2. Программа отслеживает процесс спекания образца в реальном времени с шагом 1/16 секунды, что позволяет контролировать ход процесса и при необходимости выполнить его корректировку, а также снижает трудоемкость процесса измерения и облегчает работу научного сотрудника.

3. С помощью разработанной программы выполнен эксперимент по ИПС дисперсных композиций состава.

Список литературы: 1. Райченко, А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. – М.: Металлургия, 1987. – 129 с. 2. Hong Peng. Spark Plasma Sintering of Si₃N₄-Based Ceramics. Doctoral Dissertation. Department of Inorganic Chemistry Stockholm Univer-

sity S-10691 Stockholm Sweden 2004, 104 p. **3.** Сизоненко, О.Н. Розробка методів обробки та консолідації композитів на основі карбідів заліза та титану висококонцентрованими потоками енергії [Текст]: отчет о НИР (заключ.) / рук. Сизоненко О.Н., исполн.: Литвинов В. В. [та ін.]. – Київ., 2013. – 128 с. – № держреєстрації 0112U002865. **4.** Описание программного среды разработки [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.ni.com> **5.** Описание программного среды разработки [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.home.agilent.com> **6.** Программное обеспечение для сбора и обработки данных при измерениях и испытаниях [Электронный ресурс]: / А. Курбатов // Компьютеры и технологии. – 2000. – № 7. – Режим доступа: <http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/> **7.** Описание программного среды разработки [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.mccdaq.com> **8.** Описание программного среды разработки [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.dasytec.com> **9.** Программное обеспечение для сбора и обработки данных при измерениях и испытаниях [Электронный ресурс]: / А. Курбатов // журнал «Компьютеры и технологии». – 2001 №1 – Режим доступа: <http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/> **10.** Описание программного среды разработки [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://cxem.net/software/profilab.php> **11.** Описание программного среды разработки [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.abacom-online.de> **12.** Уроки по LabVIEW [Электронный ресурс] / Авторы – сотрудники "ХОЛИТ Дэйта Системс", г. Киев – Режим доступа: <http://www.picad.com.ua/lesson.htm> **13.** Техническое описание прибора [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.sanwa-meter.co.jp> **14.** Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Издание третье, исправленное и дополненное. – Л.: Наука, 1968. **15.** Техническое описание прибора [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.cem-meter.com.cn> **16.** Техническое описание прибора [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.mastech.ru>

Bibliography (transliterated): **1.** Rajchenko, A.I. Osnovy processa spekanija poroshkov propuskaniem jelektricheskogo toka. – М.: Metallurgija, 1987. – 129. **2.** Hong Peng. Spark Plasma Sintering of Si3N4-Based Ceramics. Doctoral Dissertation. Department of Inorganic Chemistry Stockholm University S-10691 Stockholm Sweden 2004, 104. **3.** Сизоненко, О.Н. Rozrobka metodiv obrobky ta konsolidacii' kompozytiv na osnovi karbidiv zaliza ta tytanu vysokokoncentrovanymy potokamy energii' [Текст]: otchet o NIR (zakljuch.) ruk. Сизоненко О.Н., исполн.: Литвинов В. В. [та ін.]. – Київ., 2013. – 128. – № держреєстрації 0112U002865. **4.** Opisanie programmnogo sredy razrabotki [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://www.ni.com> **5.** Opisanie programmnogo sredy razrabotki [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://www.home.agilent.com> **6.** Programmnoe obespechenie dlja sbora i obrabotki dannyh pri izmerenijah i ispytanjah [Jelektronnyj resurs]: A. Kurbatov zhurnal «Komp'jutery i tehnologii». – 2000 №7 – Rezhim dostupa: <http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/> **7.** Opisanie programmnogo sredy razrabotki [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://www.mccdaq.com> **8.** Opisanie programmnogo sredy razrabotki [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://www.dasytec.com> **9.** Programmnoe obespechenie dlja sbora i obrabotki dannyh pri izmerenijah i ispytanjah [Jelektronnyj resurs]: A. Kurbatov zhurnal «Komp'jutery i tehnologii». – 2001 №1 – Rezhim dostupa: <http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/> **10.** Opisanie programmnogo sredy razrabotki [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://cxem.net/software/profilab.php> **11.** Opisanie programmnogo sredy razrabotki [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://www.abacom-online.de> **12.** Uroki po LabVIEW [Jelektronnyj resurs] Avtory – sotrudniki "HOLIT Dzejta Sistems", g. Kiev – Rezhim dostupa: <http://www.picad.com.ua/lesson.htm> **13.** Tehnicheskoe opisanie pribora [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://www.sanwa-meter.co.jp> **14.** Zajdel' A.N. Jelementarnye ocenki oshibok izmerenij. Izdanie tret'e, ispravlennoe i dopolnennoe. – L.: Nauka, 1968. **15.** Tehnicheskoe opisanie pribora [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://www.cem-meter.com.cn> **16.** Tehnicheskoe opisanie pribora [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://www.mastech.ru>

Надійшла (received) 04.03.2014

А.А. ЩЕРБА, чл.-корр. НАНУ, д-р техн. наук, проф., Інститут електродинаміки НАН України, Київ;

Д. В. ВІННИЧЕНКО, мол. наук. співр., Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв

СТАБІЛІЗАЦІЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНОГО СИНТЕЗУ НАНОВУГЛЕЦЮ

Розроблено теоретичні засади стабілізації та регулювання режимних параметрів високовольтної електророзрядної системи для нової технології електроімпульсного синтезу нановуглецю. Реалізовано принципи побудови електророзрядної системи зі стабілізацією імпульсного струму при багатократному змінненні вихідної напруги електророзрядної системи.

Ключові слова: електротехнічна система, іскровий розряд, імпульсний струм, стабілізація, резонанс, інвертор напруги, синтез нановуглецю

Вступ. Вуглецеві наноматеріали мають такі унікальні властивості, як напівпровідність, висока каталітична й абсорбційна здатність, трибологічність та поверхнева активність. Для отримання нановуглецевих структур використовують формування іскрових розрядів у рідких і твердих вуглецевомісних середовищах, але технології такого типу є малопродуктивними і багатостадійними [1].

В останні роки досить перспективним визнається спосіб отримання вуглецевих наноматеріалів з використанням електроімпульсної обробки вуглецевомісних газових середовищ [2]. За реалізації такого способу якість отриманих нановуглецевих матеріалів багато в чому визначається параметрами і режимами роботи електротехнічної системи, яка призначена для генерації високовольтних розрядних імпульсів у вуглецевомісних газах. Основною трудностю розробки такої системи є реалізація регулювання вихідної напруги в широкому діапазоні (від 100 В до 100 кВ) за стабілізації розрядного струму. Зокрема, у системах аргонового зварювання, в яких вирішують подібну задачу, використовують два незалежних генератори – високовольтний для електричного пробою проміжку та низьковольтний для стабілізації електроіскрового процесу розряду. Використання двох різних генераторів розрядних імпульсів та системи їх синхронізації призводить до ускладнення електротехнічної системи та збільшення масо-габаритних показників, мінімізація яких у деяких випадках є однією з важливих виробничих вимог. Синхронізація високовольтних потужних генераторів під час формуванні розрядних імпульсів частотою більше одного кілогерца є також досить складним завданням.

Метою роботи є створення принципів розробки електротехнічних систем формування високовольтних електророзрядних імпульсів у вуглецевмісних газових середовищах зі стабілізацією величини розрядного струму у разі багатократного змінення електричного опору технологічного навантаження та напруги розрядних імпульсів.

Як показано у роботі [2], для реалізації технології електроімпульсного синтезу нановуглецю використовують електротехнічні системи формування високовольтних електророзрядних імпульсів частотою від 1 до 100 кГц. Під час виникнення електророзрядних процесів у вуглецевмісному газовому середовищі генерується нерівноважна плазма з високими градієнтами температур і тисків, які є необхідними умовами для синтезу вуглецевих наноматеріалів. Поява нерівноважної плазми забезпечує залучення досить великих об'ємів вуглецевмісного газу до процесу синтезу нановуглецю, який конденсується в газоподібному середовищі біля іскроплазмових каналів [3].

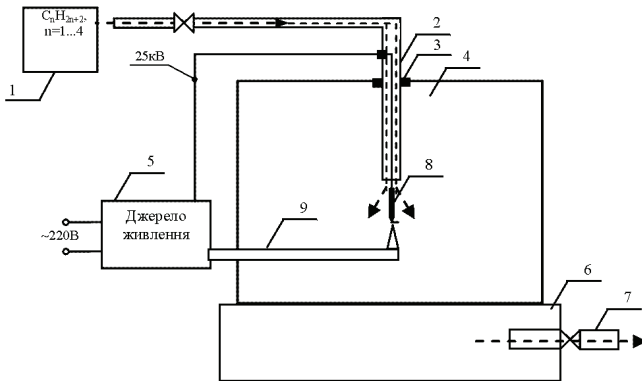


Рисунок 1 – Структурна схема електротехнічної системи для отримання нановуглецю електророзрядним способом з вуглецевмісних газів.

На рис. 1 наведено схему електротехнічної установки формування високовольтних електророзрядних імпульсів у вуглецевмісних газових середовищах зі стабілізацією величини розрядного струму за багатократного змінення електричного опору технологічного навантаження та напруги розрядних імпульсів.

Основним елементом електротехнічної системи є джерело електроживлення 5, яке генерує виникнення плазмового каналу іскрового розряду 8 між електродами 2 та 9, які знаходяться в реакторі 4, заповненому вуглецевмісним газом із балона 1.

Під час формування в газовому середовищі між електродами електричного розряду електрична енергія, що вводиться в канал розряду за допомогою джерела електроживлення, витрачається на деструкцію молекул газу і синтез нановуглецю.

Можуть виникати два режими:

- нестабільний розряд між електродами (так званий «холостий» розряд), за якого не утворюється нановуглець, та
- «продуктивний» режим розряду, за якого утворюється нановуглець необхідної структури.

Різниця між «холостим» та «продуктивним» режимами визначається мінімальним значенням діючого струму каналу розряду, при якому відбувається синтез нановуглецю.

Залежність граничного діючого значення струму каналу розряду від довжини каналу (тобто від величини електричного опору каналу розряду) на границі між указаними двома режимами представлена на рис. 2.

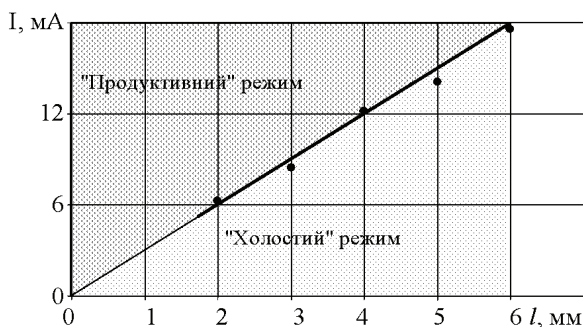


Рисунок 2 – Залежність діючого значення струму каналу розряду від довжини каналу межі між режимами

Найменші розміри частинок нановуглецю відповідають режиму з мінімальним значенням діючого струму, за якого відбувається синтез нановуглецю, тому джерело живлення повинно мати змогу стабілізувати цю характеристику при змінній величині електричного опору і відповідно довжини каналу розряду у газовому проміжку між електродами. Було визначено характеристики високовольтної електророзрядної системи, які впливають на продуктивність технології електроімпульсного синтезу нановуглецю.

В математичній моделі, яка описує високовольтну електророзрядну систему як об'єкт керування, оптимальні характеристики високовольтної електророзрядної системи представимо як компоненти вектора стану процесу синтезу нановуглецю $\mathbf{X} = \{U_{DCH}[n] \text{ або } E_{DCH}[n], U_{CH}[n] \text{ або } E_{CH}[n], I_{CH_RMS}[n], I_{ED}, I_{CH}[n]\}$.

Координата $U_{DCH}[n]$ представляє напругу гарантованого пробою ($E_{DCH}[n] = U_{DCH}[n] / l_{ED}$) міжелектродного проміжку для робочої сировини (в процесі проведення синтезу утворюється суміш пропан-водень-вуглецевий пар). Запис $U_{DCH}[n]$ показує, що ця координата має випадковий характер і визначена на множині реалізацій об'ємом n . Координата l_{ED} представляє довжину міжелектродного проміжку. Визначена залежність $U_{DCH}[n]$ від $l_{CH}[n]$

має незначний спадаючий характер за умовою зростання I_{ED} і становить (у середньому) $E_{DCH} = 2$ кВ/мм за температури в реакторі 20°C .

Координата $U_{CH}[n]$ ($E_{CH}[n] = U_{CH}[n] / l_{ED}$) представляє робочу напругу синтезу нановуглецю на каналі розряду для робочої сировини, яка також залежить від довжини міжелектродного проміжку і становить (у середньому) $E_{CH} = 0,11$ кВ/мм за температури середовища в реакторі 20°C .

Координата $I_{CH_RMS}[n]$ представляє діюче значення струму в каналі розряду, за якого відбувається синтез нановуглецю.

Отримана емпірична залежність мінімального діючого значення струму від довжини міжелектродного проміжку дозволяє визначити граничні значення струму для режиму синтезу нановуглецю з пропану.

Залежність має явно виражений лінійний характер, що дозволяє визначити питому характеристику граничного значення діючого струму ($\square I / \square l$) $_{CH_RMS}$, яка дорівнює $2,12$ мА/мм за 65°C . За інших температурних умов нахил залежності змінюється і відповідно змінюється мінімальний струм синтезу нановуглецю.

Апріорі синтез нановуглецю можливо реалізувати у разі забезпечення достатнього рівня енергії, яка визначається інтегралом добутку діючих значень напруги $U_{CH} = M(U_{CH}[n])$ і струму $I_{CH_RMS} = M(I_{CH_RMS}[n])$.

Координата $l_{CH}[n]$ представляє довжину каналу розряду і має випадковий характер, зумовлений стримерним механізмом утворення каналу розряду. Вплив цієї координати на інші зумовлює їх випадковий характер.

Залежність $l_{CH}[n]$ від I_{ED} також має випадковий характер, тому її доцільно поділяти у вигляді функції математичного очікування $l_{ED} = f(M(l_{CH}[n]))$.

Проведені дослідження показали можливість лінеаризації цієї функції на заданому діапазоні значень I_{ED} .

Компоненти вектора стану процесу синтезу нановуглецю \mathbf{X} представляють режимні параметри високовольтної електророзрядної системи для технології електроімпульсного синтезу нановуглецю.

Досліджені вольт-амперні характеристики газового розряду показали, що тільки за умови нерівноважної плазми, тобто у разі тліючого характеру розряду, відбувається синтез нановуглецю, це зумовлює константний характер $M(E_{DCH}[n])$, $M(E_{CH}[n])$ в умовах підтримки постійної температури в реакторі. Підкреслимо, що умовою синтезу нановуглецю є забезпечення струму у навантаженні рівного або більшого, ніж I_{CH_RMS} .

Однією з особливостей процесу газового розряду, за якого відбувається синтез нановуглецю, є зменшення міжелектродного проміжку, зумовлене збільшенням довжини електродів за рахунок осаду, утвореного з синтезованого порошку, який є провідним матеріалом. При цьому напруги на каналі розряду визначаються характеристиками E_{DCH} , E_{CH} , які не змінюються.

Підсумовуючи отримані результати, можна стверджувати, що для реалізації необхідних режимних характеристик високовольтної електророзрядної

системи необхідно виконати наступні умови.

1. Стабілізувати довжину міжелектродного проміжку в границях

$$l_{ED_min} \leq l_{ED} \leq l_{ED_max} \cdot \quad (1)$$

2. Стабілізувати потужність на рівні

$$P_S(l_{ED}) = U_{CN}(l_{ED}) \cdot I_{CN_RMS}(l_{ED}) = E_{CN} \cdot (\Delta l / \Delta l)_{CN_RMS} \cdot l_{ED}^2 \quad (2)$$

за допомогою стабілізації струму I_{CH_RMS} .

3. Забезпечити напругу пробою міжелектродного проміжку на рівні

$$U_{DCH}(l_{ED}) = E_{DCH} \cdot l_{ED}, \quad (3)$$

а робочу напругу синтезу на рівні

$$U_{CH}(l_{ED}) = E_{CH} \cdot l_{ED}, \quad (4)$$

де

$$U_{DCH} / U_{CH} \approx 20. \quad (5)$$

Таким чином, стабілізація режимних характеристик повинна відбуватись в широких границях, що вимагає побудови джерела живлення з широкодіапазонним регулюванням характеристик високовольтних розрядних імпульсів.

Забезпечити вимоги (1)–(5) можна з використанням джерела стабілізованого струму, який використовує так званий послідовний резонансний контур на частоті живлення.

Для побудови реального джерела стабілізованого струму сформуємо додаткову умову.

4. Частоту імпульсів в діапазоні від 1 до 100 кГц, необхідну для синтезу нановуглецю, можливо забезпечити за допомогою автономного інвертора напруги (мостового або напівмостового).

Перетворення інвертора напруги в джерело незмінного струму теоретично можна здійснити за допомогою резонансного кола, але для цього необхідно довести стабілізацію діючого значення струму джерела живлення і можливість забезпечення рівняння (5).

Аналіз процесів в резонансному Г-подібному LC-контурі у разі прямокутній вхідній напрузі.

Для проведення аналізу зробимо такі припущення:

- будемо вважати, що паразитні параметри підвищувального трансформатора є дуже малими і їх можна не враховувати;
- високовольтний високочастотний трансформатор, який є навантаженим інвертора напруги, має параметри, показані на його спрощеній схемі заміщення на рис. 3.

На рис.3 елемент L є приведеною індуктивністю розсіювання трансформатора L_S , а C є приведеною ємністю його вторинної обмотки C'_{02} (ця ємність може досягати десятків-сотень нанофарад).

Проведемо аналіз для гармонічного виду напруги джерела $e(t)$.

Нехтуючи втратами у магнітопроводі та індуктивністю намагнічування, запишемо рівняння цього кола

$$\begin{cases} e(t) = i_L Z_L - i_C Z_C + 0 \cdot i_R; \\ e(t) = i_L Z_L + 0 \cdot i_C - R \cdot i_R; \\ 0 = i_L + i_C + i_R, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Z_L = jX_L; \\ Z_C = -jX_C, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} e(t) = jX_L i_L + jX_C i_C + 0 \cdot i_R; \\ e(t) = jX_L i_L + 0 \cdot i_C - R \cdot i_R; \\ 0 = i_L + i_C + i_R, \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} jX_L & jX_C & 0 \\ jX_L & 0 & -R \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \quad \Delta = X_C X_L - jX_C R + jX_L R, \quad (9)$$

$$\Delta_{i_R} = \begin{vmatrix} jX_L & jX_C & e(t) \\ jX_L & 0 & e(t) \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}; \quad \Delta_{i_R} = e(t) \cdot jX_C, \quad (10)$$

$$\Delta_{i_C} = \begin{vmatrix} jX_L & e(t) & 0 \\ jX_L & e(t) & -R \\ 1 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad \Delta_{i_C} = -e(t) \cdot R, \quad (11)$$

$$\Delta_{i_L} = \begin{vmatrix} e(t) & -jX_L & 0 \\ e(t) & 0 & -R \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \quad \Delta_{i_L} = e(t) \cdot R - e(t) \cdot jX_C. \quad (12)$$

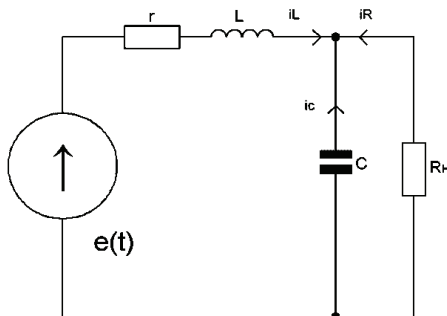


Рисунок 3 – Спрощена схема заміщення високовольтного високочастотного трансформатора

Отримаємо вирази для струмів в гілках:

$$i_R = \frac{\Delta_{i_R}}{\Delta} = \frac{e(t) \cdot jX_C}{X_C X_L + jR(X_L - X_C)}; \quad (13)$$

$$i_L = \frac{\Delta_{i_C}}{\Delta} = \frac{e(t) \cdot (R - jX_C)}{X_C X_L + jR(X_L - X_C)}; \quad (14)$$

$$i_C = \frac{\Delta_{i_L}}{\Delta} = -\frac{e(t) \cdot R}{X_C X_L + jR(X_L - X_C)}. \quad (15)$$

Для резонансу (синусоїдальна вхідна напруга) $X_C = X_L$ отримаємо вирази для струмів:

$$i_R = e(t) \frac{jX_L}{X_L^2 + jR(X_L - X_C)} = \frac{e(t) \cdot j}{X_L}; \quad (16)$$

$$i_L = \frac{\Delta_{i_C}}{\Delta} = \frac{e(t) \cdot (R - jX_L)}{X_L^2}; \quad (17)$$

$$i_C = \frac{\Delta_{i_L}}{\Delta} = -\frac{e(t) \cdot R}{X_L^2}. \quad (18)$$

Як видно з (16), струм у навантаженні не залежить від опору навантаження, а залежить тільки від реактивного опору дроселя резонансного контуру. У такому випадку для падіння напруг на послідовно з'єднаних елементах контуру можна записати вирази:

$$U_L = \frac{e(t) \cdot j \cdot (R - jX_L)}{X_L}; \quad (19)$$

$$U_C = \frac{e(t) \cdot j \cdot R}{X_L}; \quad (20)$$

$$U_R = \frac{e(t) \cdot j \cdot R}{X_L}. \quad (21)$$

З виразу (21) видно, що при збільшенні електричного опору кола навантаження (тобто при $R \rightarrow \infty$) напруга на навантаженні U_R може перевищувати вхідну напругу системи електроживлення $e(t)$ у будь-яке число разів. Цю відому властивість резонансного контуру можна використати для первинного пробою міжелектродного проміжку у газі.

Узагальнимо отримані результати на випадок прямокутної вхідної напруги.

Форма вихідної напруги мостового інвертора напруги має прямокутну форму з амплітудою U_m та періодом $T=2\pi/\omega$, розклад у ряд Фур'є має наступний вигляд:

$$e(t) = \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n}, \quad n = 1, 3, 5, \dots, \quad (22)$$

де n – номер гармоніки напруги.

Отримаємо вираз для струму навантаження, підставивши (22) в (13):

$$i_R = e(t) \frac{jX_C}{X_C X_L + jR(X_L - X_C)} =$$

$$= \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} \cdot \frac{jX_{Cn}}{X_{Cn} X_{Ln} + jR(X_{Ln} - X_{Cn})}, \quad n = 1, 3, 5, \dots, \quad (23)$$

де X_{Cn} та X_{Ln} – реактивні опори на n -й гармоніці вхідної напруги.

Якщо контур налаштовується на резонанс на першій гармоніці вхідної напруги ($X_C = X_L$), то будуть виконуватись співвідношення:

$$X_{Cn} = \frac{X_{Ln}}{n^2}; \quad (24)$$

$$i_R = \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} \cdot \frac{jX_{Ln}}{n^2 \left(\frac{X_{Ln}^2}{n^2} + jR \left(X_{Ln} - \frac{X_{Ln}}{n^2} \right) \right)} =$$

$$= \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} \cdot \frac{j}{X_{Ln} + jR(n^2 - 1)} =$$

$$= \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} \cdot \frac{j}{\sqrt{X_{Ln}^2 + (R(n^2 - 1))^2}} =$$

$$= \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\omega t)}{n \sqrt{X_{Ln}^2 + (R(n^2 - 1))^2}}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (25)$$

Підставивши $X_{Ln} = n\omega L$ в рівняння (25), отримуємо вираз для струму:

$$i_R = \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\omega t)}{n \sqrt{(n\omega L)^2 + R^2(n^2 - 1)^2}}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (26)$$

Напруга на навантаженні:

$$U_R = i_R R = \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\omega t) R}{n \sqrt{(n\omega L)^2 + R^2(n^2 - 1)^2}}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (27)$$

Введемо коефіцієнт приведенного навантаження $k = R / \omega L$ та підставимо його замість опору навантаження до (26) та (27):

$$i_R = \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\omega t)}{n \sqrt{(n\omega L)^2 + (k\omega L)^2(n^2 - 1)^2}} =$$

$$= \frac{4 \cdot U_m}{\pi \omega L} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\omega t)}{n \sqrt{n^2 + k^2(n^2 - 1)^2}}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (28)$$

$$\begin{aligned}
 U_R &= \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k \omega L \cdot \cos(n \omega t)}{n \sqrt{(n \omega L)^2 + (k \omega L)^2 (n^2 - 1)^2}} = \\
 &= \frac{4 \cdot U_m \cdot k}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n \omega t)}{n \sqrt{n^2 + k^2 (n^2 - 1)^2}}, \quad n = 1, 3, 5, \dots
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Визначимо залежність коефіцієнту амплітуд гармонік струму та напруги

$$k_{mn} = \left(n \sqrt{n^2 + k^2 (n^2 - 1)^2} \right)^{-1}$$

від значення коефіцієнту k (амплітуда першої гармоніки береться за одиницю, а k змінюємо від 0 до 1). Таку залежність наведено на рис. 4.

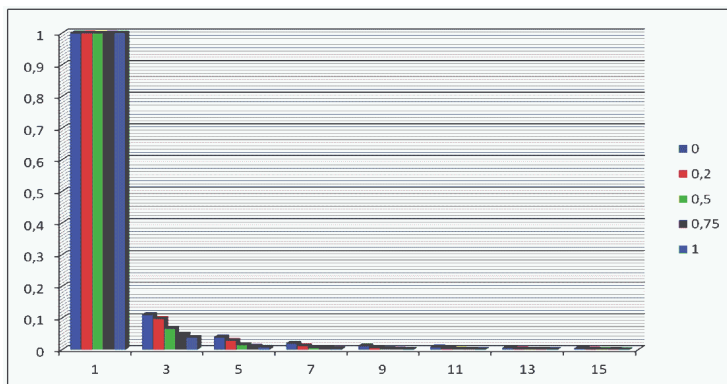


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнту амплітуд гармонік струму та напруги від значення коефіцієнту k

Із рисунку видно, що зі збільшенням активного опору навантаження (k) вміст височастотних гармонік струму та напруги падає і коефіцієнт третьої гармоніки при $k = 1$ не перевищує 4%, тому з незначною похибкою у розрахунках можна вважати домінуючою складовою струму навантаження першу гармоніку ($n = 1$) та переписати (28) та (29) у вигляді:

$$i_R = \frac{4 \cdot U_m}{\pi \omega L} \cos(\omega t); \tag{30}$$

$$U_R = \frac{4 \cdot U_m \cdot k}{\pi} \cos(\omega t) = \frac{4 \cdot U_m \cdot R}{\pi \omega L} \cos(\omega t). \tag{31}$$

З виразу (31) видно, що за умовою розімкненої електродної системи ($R \rightarrow \infty$) напруга на навантаженні $U_R \rightarrow \infty$. У разі живлення електророзрядного навантаження від інвертора з прямокутною формою вихідної напруги, напруга на навантаженні буде перевищувати амплітуду напруги живлення U_m в декілька разів. Цю властивість можна використати для первинного пробую

міжелектродного проміжку у газі і забезпечити виконання вимоги (5).

Крім того, з аналізу гармонічного складу струму навантаження видно, що Г-подібний LC-контур послаблює амплітуди високочастотних гармонік струму, і форма вихідного сигналу після LC-контуру близька до синусоїди першої гармоніки сигналу у разі високоомного навантаження.

Залежність середнього квадратичного значення струму I_{RMS} від навантаження k для досліджуваного перетворювача отримуємо з виразу (28), використовуючи відому формулу

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{I_{m1}^2}{2} + \frac{I_{m3}^2}{2} + \frac{I_{m5}^2}{2} + \dots + \frac{I_{mn}^2}{2}} .$$

Для подальшого аналізу зручно використовувати приведений середньоквадратичний струм у безрозмірному вигляді

$$I_{RMS}^* = \frac{I_{RMS}}{I_{RMS_SC}} ,$$

де I_{RMS_SC} – середньоквадратичне значення струму у разі короткого замикання навантаження.

На рис.5 показано залежність приведенного середньоквадратичного струму $I_{RMS_SC}^*$ від приведенного навантаження k .

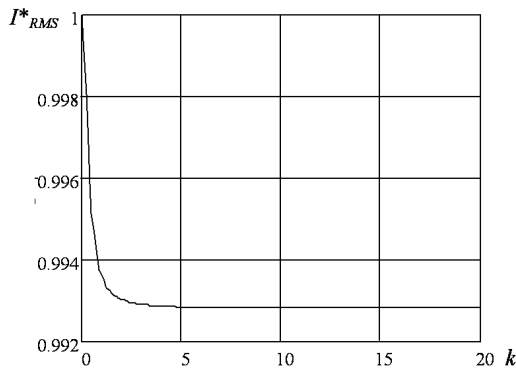


Рисунок 5 – Залежність приведенного середньоквадратичного струму $I_{RMS_SC}^*$ від приведенного навантаження k

Залежність на рис. 5 показує, що досліджуваний перетворювач забезпечує стабілізацію діючого значення струму джерела живлення з максимальним відхиленням не більше 1 % у разі змінення вихідної напруги в досить широкому діапазоні, забезпечуючи при цьому вимоги (2)–(5) до режимних характеристик високовольтної електророзрядної системи, які необхідні для реалізації електроімпульсного синтезу нановуглецю.

Висновки.

1. Створено принципи розробки електротехнічних систем формування високовольтних розрядних імпульсів у вугцевовмісних газових середовищах зі стабілізацією величини діючого значення розрядного струму у разі багатократного змінення електричного опору технологічного навантаження та напруги розрядних імпульсів.

2. Визначено і проаналізовано режимні параметри електророзрядної системи, які впливають на продуктивність технології електроімпульсного синтезу нановуглецю. Ними, зокрема, є діюче значення струму в каналі розряду та напруги на каналі в режимі синтезу.

3. Обґрунтовано можливість використання інвертора напруги з резонансним послідовним контуром як джерела живлення електророзрядної системи зі стабілізацією діючого струму у навантаженні. Показано, що така електротехнічна система дозволяє стабілізувати діючий струм з максимальним відхиленням менше 1 % у разі багатократного зміненні вихідної напруги.

Список літератури: 1. Ткачев А.Г., Золотухин И.В. Аппаратура и методы синтеза твердотельных наноструктур. – М.: Машиностроение, 2007. – 170 с. 2. Пат. 95543 Україна МПК C01V 31/02 (2006.01), H05H 1/24 (2006.01), H05H 1/32 (2006.01). Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів (варіанти) / Л.З.Богуславський, Д.В.Винниченко, Н.С.Назарова (Україна); заявник і патентовласник ІПТ НАН України. – № а 2010 01186; заявл. 05.02.2010; Опубл. 10.08.2011 р., Бюл. № 15. – 9 с. 3. Богуславский Л.З., Назарова Н.С., Овчинникова Л.Е., Винниченко Д.В., Диордийчук В.В. Электротехнический комплекс для разрядноимпульсного синтеза углеродных наноматериалов с различными магнитными свойствами // Техн. электродинамика. – 2012. – № 3. – С. 107–108.

Bibliography (transliterated): 1. Tkachev A.G., Zolotuhin I.V. Apparatura i metody sinteza tverdotel'nyh nanostruktur. – M.: Mashinostroenie, 2007. – 170. 2. Pat. 95543 Ukrayina MPK C01V 3102 (2006.01), H05H 124 (2006.01), H05H 132 (2006.01). A method for producing carbon nanomaterials (options) L.Z.Bohuslavs'kyj, D.V.Vinnychenko, N.S.Nazarova (Ukrayina); zayavnyk i patentovlasnyk IPT NAN Ukrayiny. – № а 2010 01186; zayavl. 05.02.2010; Opubl. 10.08.2011 r., Byul. № 15. – 9. 3. Boguslavskij L.Z., Nazarova N.S., Ovchinnikova L.E., Vinnichenko D.V., Diordijchuk V.V. Elektrotehnikeskij kompleks dlya razryadnoimpul'snogo sinteza uglerodnyh nanomaterialov s razlichnymi magnitnymi svojstvami Tehn. elektrodinamika. – 2012. – № 3. – 107–108.

Надійшла (received) 20.02.2014

А.Г. ЮЩЕНКО, канд. физ.-мат. наук, профессор, НТУ «ХПИ»;
А.В. СУББОТИНА, магистр, НТУ «ХПИ»;
Т.В. ЗАХОЖАЕВА, магистр, НТУ «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЦЕПТРОНА КАК РАСТУЩЕЙ НЕЙРО- СЕТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ СИМВОЛОВ

Проведено исследование работы перцептрона для решения задачи распознавания символов. Выбрана и обоснована структура нейронной сети, показана возможность улучшения свойств обобщения путем наращивания ее структуры, проанализирована работа перцептрона при распознавании не только двух, но и четырех букв, а также букв различного начертания.

Ключевые слова: перцептрон, распознавание, символ, растущая нейронная сеть.

Постановка проблемы. В настоящее время в задачах обработки и анализа данных широко применяются искусственные нейронные сети [1-3]. Наряду с необходимостью обеспечения репрезентативности обучающей выборки проблемой является и нахождение оптимальной структуры нейросети: числа слоев и нейронов в каждом из них, формирование матрицы весовых коэффициентов, а также подбор оптимальной методики обучения. Пользователь обычно использует структуру, предлагаемую компьютерной программой-нейроимитатором по умолчанию, и только в случаях невозможности достижения требуемого качества общения сети, изменяет ее размер, но делает это обычно методом «случайного поиска». Избыточность же получаемой структуры нейронной сети приводит к излишней нелинейности, реализуемой нейронной сетью разделяющей поверхности или функции регрессии, что влечет за собой и худшие обобщающие ее способности.

Растущая нейронная сеть – сеть увеличивающейся структуры [4]. В процессе ее функционирования, по специально определенным правилам к сети добавляются новые вершины и связи и удаляются старые, таким образом, система способна обобщать и классифицировать знания и создавать ассоциативные связи между разнородными данными. Растущая нейросеть стартует с очень простых и небольших структур, которые разрастаются и усложняются по мере необходимости. Выбор останавливается на такой архитектуре сети, которая обеспечивает наивысшую точность прогнозирования или обобщения при проверке с помощью испытательных наборов.

Анализ литературы. На сегодняшний день существует множество программ и компонентов для работы с нейронными сетями, однако большинство из них позволяет выполнять ограниченный набор операций (моделировать работу сети: строить, обучать, тестировать). К таким нейросимуляторам от-

носятся NeuroOffice, NeuroPro, TextAnalyst, After Scan, RawData Analyzer, Deductor Lite [5,6]. С другой стороны, существуют также системы распознавания текста - ABBYY FineReader, OCR CuneiForm, SunnyPage, RiDoc [7], но вследствие того, что они являются коммерческими продуктами, многие внутренние алгоритмы их работы скрыты от общего доступа, поэтому их невозможно скорректировать и усовершенствовать. В этой связи становится актуальной проблема поиска эффективных и универсальных подходов повышения качества обобщения нейросети. Одним из перспективных направлений является использование нейросетей с растущей архитектурой [4,8,9], однако в литературе не удалось обнаружить источников применения аналогичных стратегий к перцептрон, что делает актуальным такое исследование.

Цель статьи – исследование возможности решения проблемы корректного распознавания символов за счет увеличения структуры сети на примере перцептрона.

Исследование работы перцептрона с растущей структурой сети. В ходе работы разработан перцептрон для решения задачи распознавания букв. Он содержит S-элементы, увеличивающиеся от 4 до 576, 2 ассоциативных A-нейрона в скрытом слое, которые могут возрастать до 600 и один выходной R-нейрон.

Разделение множества G изображений на два класса G_1 и G_2 выполняется с помощью одного выходного элемента: изображениям первого класса соответствует положительный выходной сигнал (+1) R-элемента, а второго класса – отрицательный (-1).

Обучение перцептрона выполняется с помощью α - и γ -систем подкрепления согласно стандартным алгоритмам [10-12].

Сначала система обучается распознавать введенные символы. Затем выполняются распознавание букв. В том случае, если оно прошло неудачно, добавляется A-элемент и сеть повторно обучается. Цикл выполняется до тех пор, пока буква не будет правильно распознана. Таким образом, реализуется стратегия роста сети путем увеличения количества нейронов и изменение связей (активных весов) [9]. На рис. 1 изображена структура растущей нейронной сети.

В качестве функции активации выбрана пороговая, со значением, которое зависит от входных данных.

Изображение символов вводится при помощи сетки, размер которой устанавливается пользователем и может изменяться от $2*2$ до $24*24$.

Рассмотрим пример обучения перцептрона распознаванию букв «А» и «Е». Интерфейс программы показан на рис. 2.

Когда на вход перцептрона подается изображение буквы А, возбуждаются все S-нейроны, соответствующие закрашенным ячейкам сетки, задающей букву.

Таблица весов связей перцептрона заполняется случайными числами из

диапазонов, описанных ниже. Вместе с таблицей весов связей перцептрона заполняется еще таблица величин сигналов на входах А-элементов. Значения этой таблицы напрямую зависят от введенных символов и от значений таблицы весов связей перцептрона. После вычисления вышеуказанных таблиц становится доступной адаптация весов связей перцептрона с помощью альфа и гамма систем подкрепления, соответственно. Вычисляется порог R-элемента, в соответствии с которым распознаются символы, выполняется обучение по выбранному пользователем правилу.

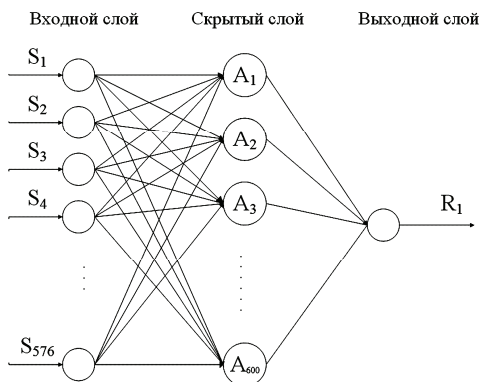


Рисунок 1 – Растущая нейронная сеть

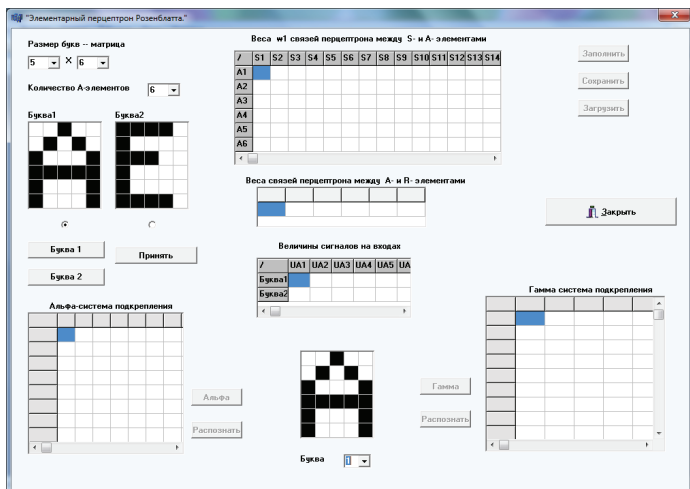


Рисунок 2 – Интерфейс программы

Далее можно распознать символ с помощью альфа либо гамма коррекции. В результате получаем: если буква распознана неправильно, то выводится соот-

ветствующее сообщение, добавляется дополнительный А-нейрон и выполняется переобучение с последующим распознаванием этой же буквы. Переобучение выполняется до тех пор, пока символ не будет распознан правильно.

Было проведено тестирование программы в разных диапазонах весовых коэффициентов, при постоянной архитектуре. Сначала значения весовым коэффициентам присваивались из диапазона $[0,1;0,9]$. Как показали численные эксперименты, данные значения оказались неоптимальными. Это выяснилось еще на этапе обучения сети. В процессе обучения значения весов обновлялись в соответствии с выбранным правилом (альфа- и гамма-подкрепления). Программа закикливалась – не достигалось условие останова (суммарное значение входного сигнала R-элемента должно превысить значение порога R-элемента). Установлено, что если весовые коэффициенты лежат в диапазоне $[-0.1,0.1]$, в общем случае, сеть работает неплохо, однако при небольшом количестве несовпадений способна довольно существенно наращивать структуру; количество А-элементов увеличено с 6 до 10. Достаточно успешно происходит распознавание символов с весами в диапазоне $[-0.2,0.2]$ с незначительным изменением архитектуры; количество А-элементов увеличивается с 6 до 7. Наиболее удачным является случай, когда веса лежат в диапазоне $[-0.3,0.3]$; в большинстве случаев сеть работает без дополнительных А-элементов (рис. 3).

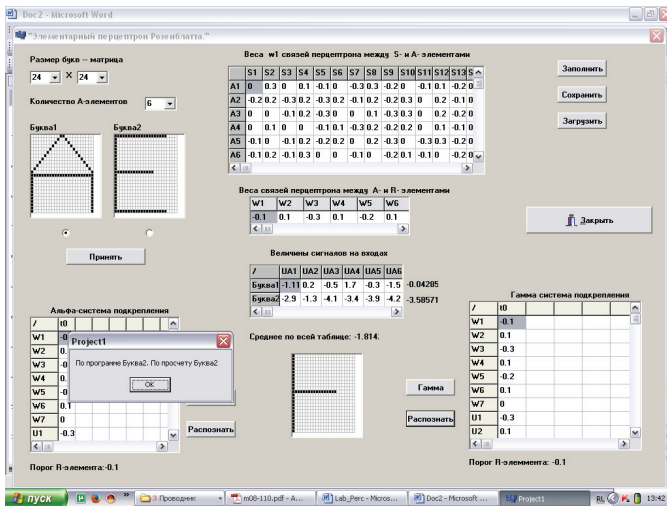


Рисунок 3 – Распознавание с весами в диапазоне $[-0.3,0.3]$

В ряде случаев (при задании различных размеров сетки), при весовых коэффициентах $[-0.4,0.4]$ не распознавались буквы даже в исходном виде (без изменений и добавления шума). Если весовые коэффициенты лежат в диапазоне $[-0.5,0.5]$, сеть работает довольно неплохо, однако, в некоторых случаях способна довольно существенно наращивать структуру.

Также сравнивалось распознавание жирных букв в тех же диапазонах. Как и в предыдущем случае наилучшими оказались результаты с весовыми коэффициентами в диапазоне $[-0.3, 0.3]$ (рис. 4).

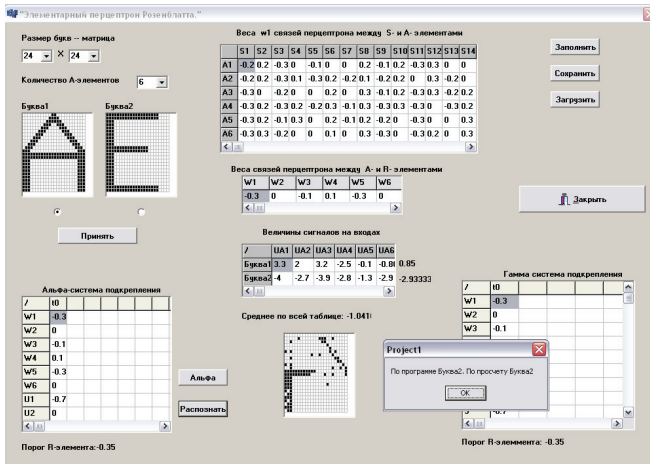


Рисунок 4 – Распознавание жирных букв с зашумлением

Затем было выполнено исследование работы программы с четырьмя буквами (рис. 5). Для данной задачи использована сеть, аналогичная предыдущей, но содержащая 2 R-элемента.

Все этапы работы выполняются аналогично. Весовые коэффициенты выбираются из диапазона $[-0.3, 0.3]$.

В связи с тем, что имеется 2 R-элемента, для упрощения процесса распознавания букв используется предварительный порог — среднее значение между порогами R-элементов. Предварительный порог распределяет символы по предварительным классам. Затем происходит распределение внутри такого предварительного класса: первый R-нейрон отвечает за классификацию первого и второго символов, а второй R-нейрон – третьего и четвертого. Затем выполняется соотнесение букв непосредственно к классам (4 класса). Для корректной работы сети определены *рекомендации по объединению символов в предварительные классы*:

- в одном предварительном классе должны быть непохожие буквы;
- идеальный вариант, когда множества, из которых состоят буквы, не пересекаются;
- поскольку такой вариант редко реализуется, то у букв должно быть минимальное количество общих элементов.

Разделение букв на два предварительных класса обусловлено количеством R-элементов. В том случае, если потребуются распознать большее число символов, необходимо будет значительно усложнять архитектуру сети.

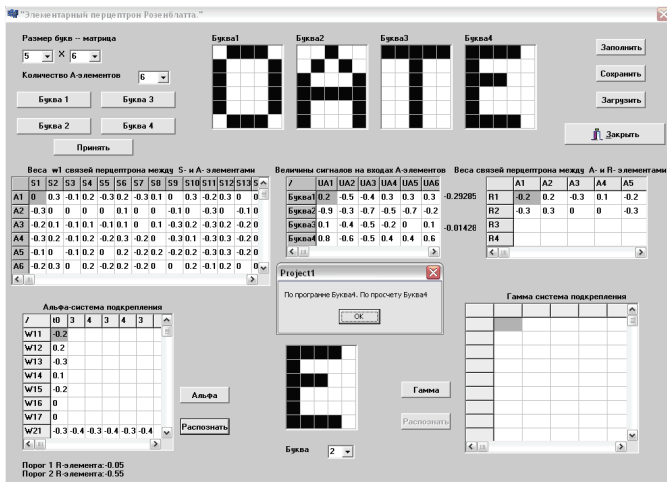


Рисунок 5 – Распознавание среди четырех букв

Выводы. В ходе работы проведено исследование работы перцептрона для решения задачи распознавания символов. Экспериментально установлено, что наиболее удачным диапазоном весовых коэффициентов, от которых зависит корректность распознавания является $(-0.3, 0.3)$. Поиск оптимальной структуры привел к пониманию целесообразности использования растущей нейронной сети. Проведен анализ работы перцептрона при распознавании не только двух, но и четырех букв, а также букв разного начертания. Сформулированы рекомендации по объединению букв в предварительные классы. Таким образом, использование растущих нейронных сетей является эффективным способом решения задачи распознавания букв, являющейся одним из перспективных направлений в применении нейросетевых технологий, включая перцептрон.

Список литературы: 1. Царегородцев В.Г. Конструктивный алгоритм синтеза структуры многослойного перцептрона // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. – Вестник КазНУ им. Аль-Фараби, серия «математика, механика, информатика». – 2008. – № 4 (59). – Совм. выпуск. Ч. 3. – С. 308-315. 2. Ежов А.А., Шумский С.А. Нейрокомпьютинг и его применения в экономике и бизнесе: серия «Учебники экономико-аналитического института МИФИ» под ред. проф. В.В. Харитонов. – М.: МИФИ, 1998. – 224 с. 3. Искусственные нейронные сети [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.victoria.lviv.ua/html/oio/html/theme5_rus.htm. – Загл. с титул. экрана (просм. 20 марта 2014 года). 4. Корягин Е.В. Разработка интеллектуального ассистента управления автомобилем // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2012. – № 19. – С. 42-46. 5. Пользовательские программы [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.alife-soft.narod.ru/programs.html> – Загл. с титул. экрана (просм. 20 марта 2014 года). 6. Программное обеспечение [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ole-u.narod.ru/Razdel5.html> – Загл. с титул. экрана (просм. 20 марта 2014 года). 7. Основные понятия и определения теории распознавания текста. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ne-boleu.ru/informatika/15757/index.html>. – Загл. с титул. экрана (просм. 20 марта 2014 года). 8. Christopher MacLeod, Grant M. Maxwell. Incremental Evolution in ANNs: Neural Nets which Grow // School of Electronic and Electrical

Engineering, The Robert Gordon University, Aberdeen. **9.** Hsin-Chia Fu, Hung-Yuan Chang, Yeong Yuh Xu, and H.-T. Pao. User Adaptive Handwriting Recognition by Self-Growing Probabilistic Decision-Based Neural Networks // IEEE Transactions on neural networks. – 2000. – Vol. 11, № 6. **10.** Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики: Перцептроны и теория механизмов мозга = Principles of Neurodynamic: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. – М.: Мир, 1965. – 480 с. **11.** Эшби У. Р. Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения = Design for a Brain. The origin of adaptive behavior. – М.: ИЛ, 1962. – 397 с. **12.** Основы нейрокомпьютингу / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Х.: НТМТ, 2012. – 128 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Caregorodcev V.G. Konstruktivnyj algoritm sinteza struktury mnogoslojnogo perseptrona Vychislitel'nye tehnologii. – 2008. – Т. 13. – Vestnik KazNU im. Al'-Farabi, seriya «matematika, mehanika, informatika». – 2008. – № 4 (59). – Sovm. vypusk. Ch. 3. – 308-315. **2.** Ezhov A.A., Shumskij S.A. Nejrokomп'yuting i ego primeneniya v ekonomike i biznese : seriya «Uchebniki ekonomiko-analiticheskogo instituta MIFI» pod red. prof. V.V. Haritonova. – М.: MIFI, 1998. – 224. **3.** Iskusstvennye nejronnye seti [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa : http://www.victoria.lviv.uahtmltohtmltheme5_rus.htm. – Zagl. s titul. ekrana (prosm. 20 marta 2014 goda). **4.** Koryagin E.V. Razrabotka intellektual'nogo assistenta upravleniya avtomobilem [Tehniko-tehnologicheskie problemy servisa. – 2012. – № 19. – 42-46. **5.** Pol'zovatel'skie programmy [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa : <http://www.alife-soft.narod.ruprograms.html> – Zagl. s titul. ekrana (prosm. 20 marta 2014 goda). **6.** Programmnoe obespechenie [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa : <http://ole-u.narod.ruRazdel5.html> – Zagl. s titul. ekrana (prosm. 20 marta 2014 goda). **7.** Osnovnye ponyatiya i opredeleniya teorii raspoznavaniya teksta. [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa : <http://neboleu.ruinformatika15757index.html>. – Zagl. s titul. ekrana (prosm. 20 marta 2014 goda). **8.** Christopher MacLeod, Grant M. Maxwell. Incremental Evolution in ANNs: Neural Nets which Grow School of Electronic and Electrical Engineering, The Robert Gordon University, Aberdeen. **9.** Hsin-Chia Fu, Hung-Yuan Chang, Yeong Yuh Xu, and H.-T. Pao. User Adaptive Handwriting Recognition by Self-Growing Probabilistic Decision-Based Neural Networks IEEE Transactions on neural networks. – 2000. – Vol. 11, № 6. **10.** Rozenblatt F. Principy nejrodinamiki: Perceptrony i teoriya mehanizmov mozga = Principles of Neurodynamic: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. – М.: Mir, 1965. – 480. **11.** Eshbi U. R. Konstrukciya mozga. Proishozhdenie adaptivnogo povedeniya = Design for a Brain. The origin of adaptive behavior. – М.: ИЛ, 1962. – 397. **12.** Osnovy nejrokomп'yutynhu V.D. Dmitriyenko, A.Yu. Zakovorotnyj. – Kh.: NTMT, 2012. – 128.

Надійшла (received) 04.03.2014

A.G.YUSHCHENKO, Ph.D., Prof., NTU «KhPI»;

D.B.MAMEDOV, Ph.D. student, NTU «KhPI»

EVOLUTIONARY DESIGN OF SEVEN-TIER LM-MODE FILTERS OPTIMIZED WITH ORIGINAL KNOWLEDGE-BASED CAD SYSTEM

The evolutionary strategy of multi-tier WDR - filters with LM-modes, optimized with original knowledge-based CAD system designing is proposed and tested. Main point of the strategy is to solve the problem of synthesis and optimization of the seven - (or more) tiered filter through the gradual complication of the simplest - one-tiered design, which corresponds to the evolutionary principle of gradual cost function complication. The efficiency of the strategy is confirmed by the designing of three to five and seven-tier millimeter filters, which are intended for the next generation of millimeter waveband wireless systems and conform to the latest standards like ECMA- 387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c and IEEE 802.11ad.

Keywords: Evolutionary strategies, Knowledge-based CAD system, LM-mode filters, WirelessHD, IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11ad.

Introduction. The creative nature of biological evolution is demonstrated not only by the fact that it creates a surprising variety of organisms that can impress us with its phenotypic originality [1], but the fact of homological creativity of nature and the individual [2,3]. Biological evolution in the mathematical sense is the result of a phenotypes optimization period that took more than 4 billion years in the space of our planet by means of mutation genotypes. A fundamental feature of the process of evolution is compatible co-evolutionary organisms in ecosystems, because each of them other representatives of the biosphere play the role of the so-called "Cost function", which itself is subject to change due to mutation genome plasticity. Consideration of organisms as effective "solvers" problems of survival [4], led to the formation of a new direction in artificial intelligence – the so-called "Computing" is based on the model of some aspects of evolutionary mechanisms [5,6].

The observed tendency for increase in density of information channels is objective and will continue to intensify in the future as far as it ensures synchronization and optimization of industrial and technological processes in development of societies. The societies themselves possess obvious features of a super-organisms in which each active individual using his/her PC strives to integrate into Internet and telecommunications networks like in a «nervous web» of developing «global mind» [7, 8]. The evident homology of all known creative processes leads to concept of Geo-Solaris, i.e. a view of the Earth embraced with evolving living matter as an intuitively thinking brain bringing about the bio-technological mind of Noo-

sphere [8]. A characteristic feature of this noogenesis [9] is in replication of personal intellectual potential on the level of the mankind: the world population is approaching the number of the nerve cells in an individual brain while the World-Wide Web is acquiring the structure of a neural network [10]. Actually, we observe the rapid growth of wireless networks based on dozens of different standards regulating frequency resources ranging from hundreds of megahertz to hundreds of gigahertz. Recently produced standardization of ranges 3-5 millimeter waves allows to expect dynamic growth of high – quality radio- telecommunication networks of information relaying [11-13]. Currently industrial usage of millimeter waves (predicted back in the 60s) is widespread because (1) it allows obtaining «sharply directed emission, which is important not only for radar systems but for wireless systems as well, particularly for radio relay lines»; (2) in this wave- band, «atmospheric and many types of industrial noise become insignificant; (3) with higher frequencies the density of stations in the air becomes less significant so more stations can work without interference;(4) the lower density allows using noise-resistant wideband modulation systems; (5) greater transmission speed requires greater frequency...» [14]. Such features of this waveband make it «extremely attractive for high-speed ultra-wideband transmission, including transmission of video streams from multiple video cameras, transmission of high definition video and traffic management in cellular networks. Besides, wide band allows a variety of scrambling schemes and error correction codes, provides greater choice of optimal methods for modulation and multiple access in data transfer, which allows data transmission at the specified speed with very low signal-to-noise ratio» [15]. Two most important economic factors should be briefly noted as well: there are no licenses required for usage of this waveband and the equipment necessary is quite small in size. All these circumstances caused a new «innovation wave» here resulting in its turn in great demand for high-quality hardware components [15, 16]. According to this there is a necessity in development of the proper high-quality millimeter wave components base. It is clear that the electromagnetic situation on the air requires constant improvement of receiver protection against electromagnetic interference as well as more strict requirements to transmitters, which are the sources of the interference. Traditionally these problems are solved using passive band filters mounted on receiver inputs and transmitter outputs. Among the known micro – and millimeter wave filters, the designs based on leucosapphire and quartz partially filled waveguide-dielectric resonators (WDR) pleased into cut-off waveguides are distinguished due to their general quality parameters, such as high unloaded Q's, sparse spectrum of parasitic eigen- modes and usable level of transmitted power [17, 18]. It should be noted that in the review article listed links of filter designs are incorrectly placed [19], though general bibliography contains its references. Note that the technical implementation of the WDR filters confirmed experimentally up to 100 GHz[20]. Moreover, long-term experience of their application for the defense industry of the USSR led to the development of technology supporting both microwave and microwave [21, 22] – optical of primary – dielec-

tric substrates and of secondary – of the bars and resonators themselves [23-25]. High values of resonators Q allows to design multi-tier filters that have improved selectivity properties with maintaining of low level of insertion losses in the band-pass of 0.5-0.7 dB. In this regard, problem of the synthesis of design and its optimization according to the priority criteria, such as the shape factor or the required level of extra band attenuation at certain frequencies becomes relevant. This article proposes and confirms the efficiency of the evolutionary strategy to the synthesis of seven-tier WDR filters design with LM-modes optimized by original knowledge-based CAD system, which was used previously for the filters in a smaller number of tiers [26 - 29]. Thus, it is proposed to solve the problem of synthesis and optimization of the seven-tier (or more tier) filter through the gradual complication of simplest one-tier design that corresponds the evolutionary strategy of gradual complication of the cost function.

The disadvantages of filters designing traditional methods. The traditional methods of filter synthesis are based on various prototypes from the circuit theory with concentrated or distributed parameters. Their basic disadvantage is that they don't account for higher wave types induced on filter discontinuities. Currently, there are different CAD systems for designing active and passive microwave components. They use wide range of numerical and analytical methods and provide greater opportunities for component design but come short when it concerns computation error estimation or design optimization. The common drawbacks of direct and combined numerical optimization methods are insolvability of the problem of finding the global extremum of the objective function and exponential growth of calculation time with the increase in the number of resonators or the accuracy of calculations. Such systems usually do the optimization using gradient and probabilistic methods whose low efficiency can be explained by the fact that most alterations in the task (design) parameters done during the algorithm steps are unjustified from the physical point of view. Therefore, the development of knowledge-based optimization methods is a prospective and actual task. From a mathematical point of view, this approach is an alternative to well-known optimization methods and is also very promising for solving the problem of finding a global extremum of an objective function. For many applications, it is necessary to deal with multi-tier filters, filters based on WDR seem to be very promising. However, only three-tier и five-tier structures have been comprehensively studied so far [26 - 29]. From the fact that it was possible to develop system of the synthesis of three-tier и five-tier structure, the establishing of the systems of seven - and a multi-tier structures does not automatically follow. The problem lies in the adjustment of productions (rules) in such a way as not only to eliminate possible «ringing» of the system, but also regularize them in the correct logical order, ensuring the implementation of rule of inference, i.e. completion of designing stage at all. The number of the productions, by the increasing of the number of filter tiers by two, increases in the half or two times, in case five-tier structure it is about – from twenty five to fifty, due to significant increases in the number of possible states of the system to be optimized.

In case of seven-tier the number of productions can range from thirty five to eighty. It should be noted that the formalization of the productions requires a deep electrodynamic understanding of the physics of the process of frequency response of the multi-tier resonance structure forming, that forms a feed through filter.

The design of seven-tier WDR filter with Quasi-Modes and the method of its electrodynamic modeling. Figure 1 presents basic design of seven-tier WDR filter with H-plane dielectric plates with quasi- LM_{101} -modes [30]. Cross-shapes of the cut-off waveguide cross-sections enable to fix there E and H-plane resonance size dielectric inserts by means of projections [30, 31]. Quartz and leucosapphire-monocrystals are used as dielectric materials in designing band-pass filters for millimeter wave band, thus ensuring that the dimensions of inserts are suitable for manufacturing process and unloaded Q of the working type electromagnetic modes is induced in the inserts. Comparative characteristics of WDR and microstrip filters, including superconducting, show the advantage of the first on the electrical parameters and justify the possibility of adapting their designs to the planar technologies [27].

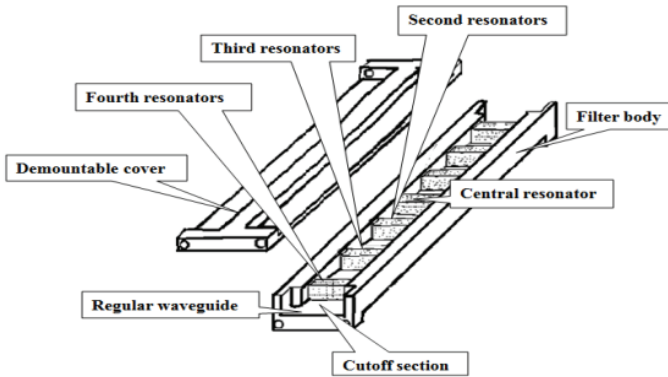


Figure 1 – Seven-tier WDR LM_{101} -mode filters geometry

In this structure, the problem of scattering H_{10} waves is solved with mode matching method described in [7, 9, 18] where electrodynamic model parameters are discussed in detail and the model validity is illustrated through comparison of calculated values with experimental results.

Knowledge-based CAD System for Seven-Tier LM-Mode Filter – Evolutionary Approach. To design such filters, we modified the knowledge-based CAD (KB CAD) system developed previously for *three-* and *five-tier* microwave filters [26-29]. Whereas a detailed description of this system is published in an open access journal, we provide here only its brief description focusing on the developments done to process seven-tier filters. Thus, basing on formalized physical

knowledge about the behavior of coupled resonators, the KB CAD system analyses electromagnetic signal passing through a filter structure and makes decisions gradually approaching the optimal filter design through a series of changes in its geometry. The efficiency of the KB CAD system depends only on the accuracy of the solution for the analysis problem and on the accuracy with which the conditions of the rules applied match the actual data. Therefore the efficiency is rather high: the errors don't exceed 2 %. The optimization of a filter design is done in four evolutionary stages, as shown on Figure 2 and Figure 3.

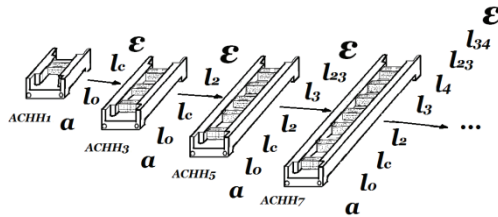


Figure 2 – The sequence of evolutionary multi-tier filters design

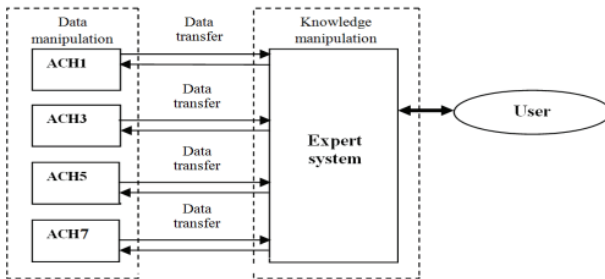


Figure3 – Logical structure of seven-tier LM-modefilter optimized with KB CAD system

First, the intellectual system calculates the length of the central resonator and searches for the optimal value of dielectric permittivity ϵ keeping the length of the resonator within 1 – 0.3 mm limits (depending on frequency), which is a compromise between its unloaded Q factor and manufacturability. At the second stage, the optimized parameters of one-tier filter are input to the block of three-tier filter design. On calculation of three-tier filter frequency response, the system optimizes the filter design for specified bandwidth reducing its overall length. The first two steps are repeated for different cut-off waveguide widths, thus forming a set of filter designs with their electrical properties. At the third stage, the optimized parameters of three-tier filters are input to the block of five-tier filter design. First, this block performs symmetrization and elimination of marginal and middle pulsations using logical rules like the following: IF there is poor frequency response to the left of the central frequency THEN reduce the length of the outermost resonators; IF there is poor frequency response to the right THEN increase the length of the outermost resonators.

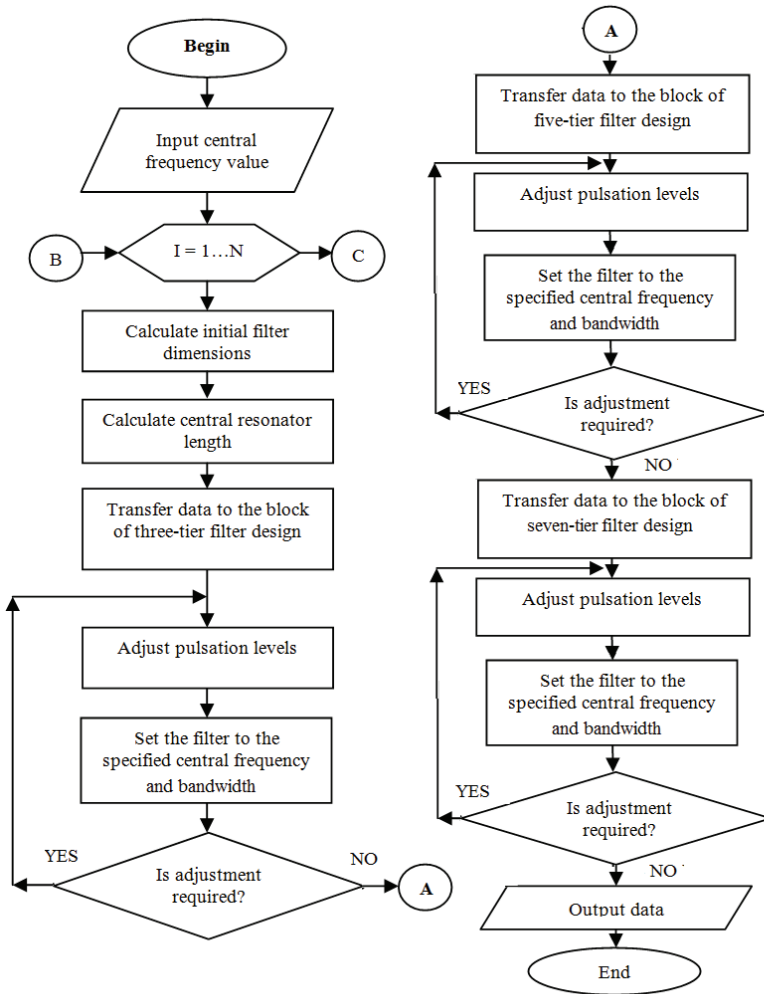


Figure 4 – The KB CAD system algorithm for seven-tier WDR filters

IF there are poor frequency responses in the middle THEN reduce the distance between central and middle resonators. Then, the filter is adjusted for central frequency with the following rules: IF central frequency is above the specified value THEN enlarge all resonators; IF central frequency is below the specified value THEN shrink all resonators; etc. At the final stage parameters of the five-tier filter are passed as the initial for the seven-tier designing, where the modified products are used similarly to the listed. A feature of this stage of the designing is a

foreground formation of bandwidth with a given level of irregularity and the subsequent adjustment of the design by proportional scaling of geometric dimensions. Figure 4 shows a diagram of the above algorithm, and Fig. 5 – Fig.6 demonstrate initial and final stages of filter designing under working frequency of 83.5 GHz with 6% bandwidth.

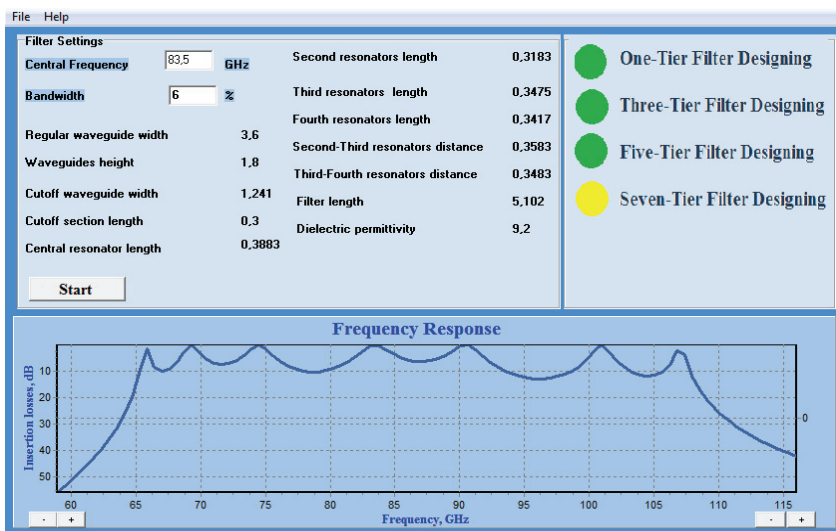


Figure 5 – KB CAD seven-tier filter optimization initial state

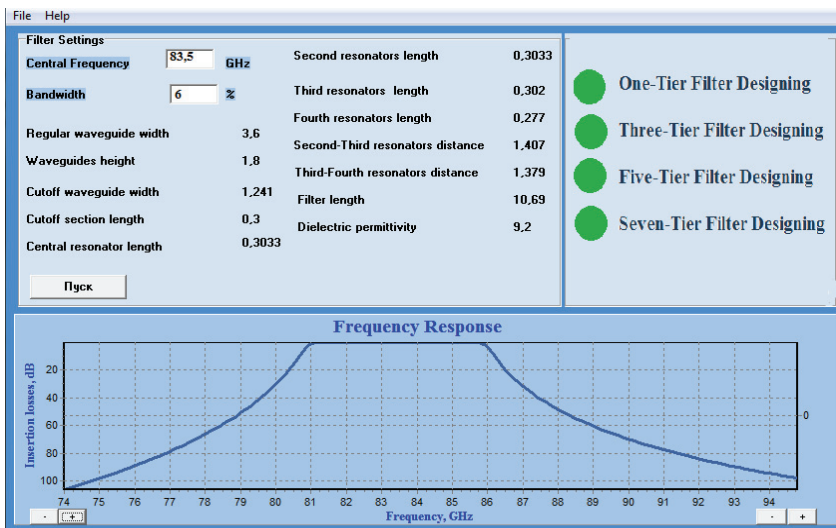


Figure 6 – KB CAD system has finished seven-tier filter optimization

The results of the evolutionary designing of seven-tier filters of E-band range. The efficiency of KB CAD system was tested in the evolutionary designing of band pass filters that can be applied as preselectors or form the basis of the new millimeter generation of radio - telecommunication systems duplexers. The frequency response of the filters shown in Fig. 7 - Fig. 11 and their structural dimensions in the Appendix.

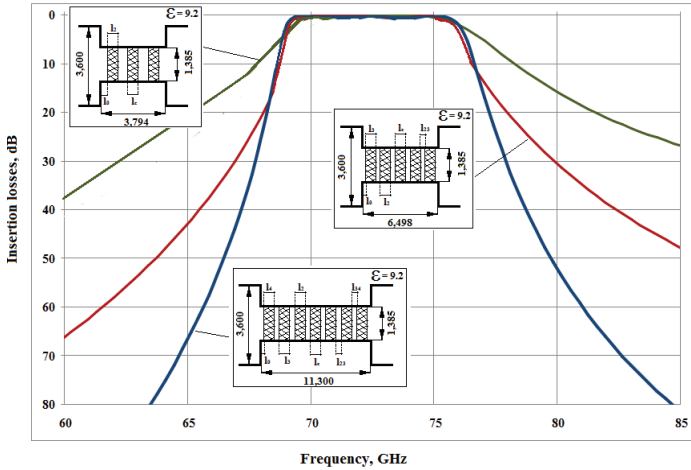


Figure 7 – Frequency responses of the filters ($f = 73.5 \text{ GHz}$, $\delta f = 6.8 \%$) designed with the KB CAD system in three- and five- and seven tier variants: band passes

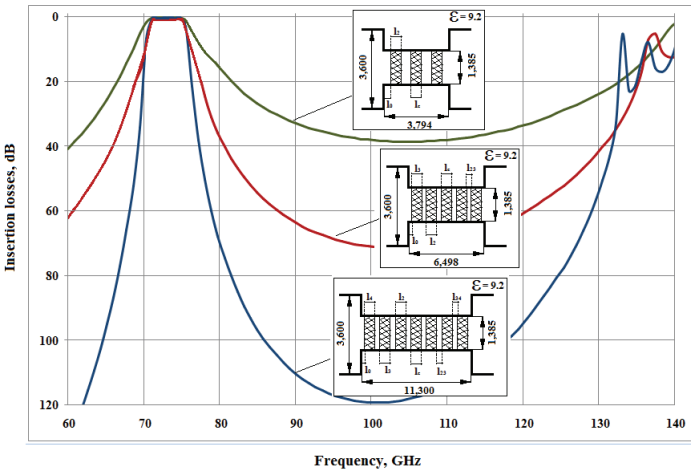


Figure 8 – Frequency responses of the filters ($f = 73.5 \text{ GHz}$, $\delta f = 6.8 \%$) designed with the KB CAD system in three- and five- and seven tier variants: extra-band attenuations

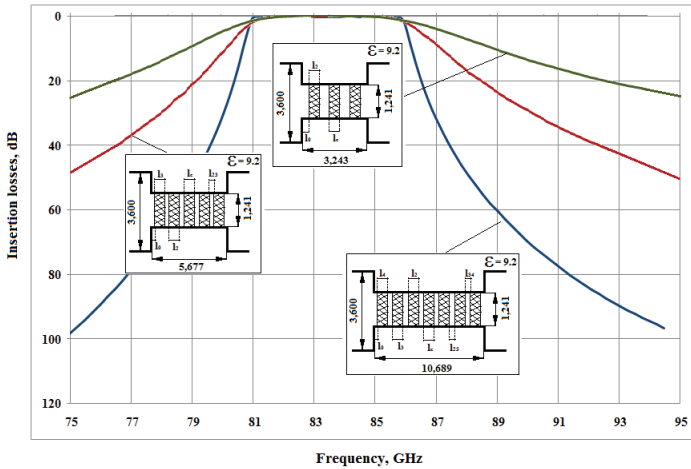


Figure 9 – Frequency responses of the filters ($f = 83.5 \text{ GHz}$, $\delta f = 6 \%$) designed with the KB CAD system in three- and five- and seven-tier variants : band passes

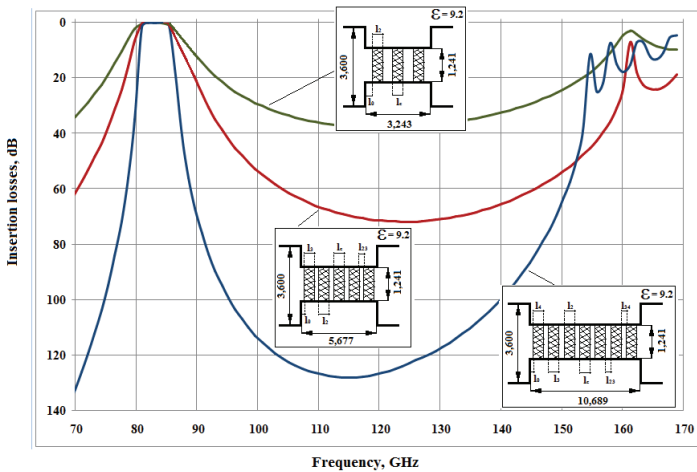


Figure 10 – Frequency responses of the filters ($f = 83.5 \text{ GHz}$, $\delta f = 6 \%$) designed with the KB CAD system in three- and five- and seven-tier variants: extra-band attenuations

The comparison of the calculated characteristics of three, five and seven-tier designs allows to evaluate their electrical, weight and size parameters, indirectly, the cost parameters. As we see an increase of tiers dramatically increases the steepness of the slopes of the response and respectively, the level of extra band attenuations. By increasing the number of tiers a slight approximation of the parasitic bandwidth happens due to its expansion, since at higher frequencies resonators are more connected than at lower where the attenuation of waves in the cutoff

waveguide is higher. Comparison of seven-tier duplex filters demonstrates their prospect for EMC of transmitter and receiver, which are using the same antenna system, in this case will it is required some engineering redesign in order to combine them into a single waveguide tract.

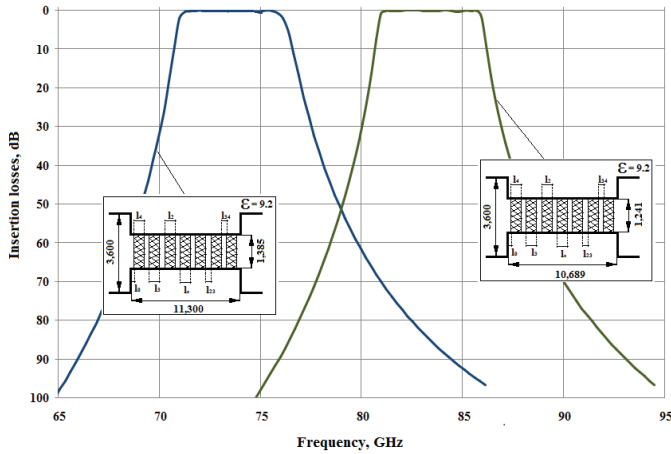


Figure 11 – Evaluation of designed filters duplex using

Conclusions. Thus, we have proved and confirmed by numerical experiments the efficiency of the evolutionary strategy to step by step designing of seven-tier WDR filters using the original KB CAD system. Corresponding to the strategy the designing of highest level filters based on the results of lower layer designs optimization, which contain the lower number of tiers and, therefore, essentially easier to optimize. The efficiency of the proposed strategy shows the results of the optimization of telecommunication filters that correspond to the latest standards like ECMA- 387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c and IEEE 802.11ad. A comparative analysis of three-five and seven -tier filter properties and described designs of the letter, which have been provided. It seems that through the optimization with the system, we can obtain high-quality filter designs, which are fairly manufacturable as well. As a whole the successful solution of the task of developing of the knowledge based CAD system for optimization of the seven -tiers filters makes the pillar for developing of the optimization system of the nine-tier structure. Since KB CAD system is based on a deep understanding of the dynamics of the frequency of coupled resonators, which in many ways is similar to the resonators of different classes with the evanescent modes, we can expect the possibility of its modification for the multi-tier filters of other designs.

References: 1. Fogel D.V. What is the evolutionary computation? // IEEE Spectrum. – February 2000. – PP. 26-32. 2. Yushchenko A.G. Prospects of biotechnologic evolution of a living matter // "Nauka Kharkivschiy-2000": Competition research work in the category "Basic research". – Kharkiv, National

Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (awarded with a diploma by the organizing committee), 2000. **3.** *Yushchenko A.G.* Theory of creative processes as a scientific basis of biocentrism in eco- and bioethics // *Ecologicheskii Vestnik*. – International Sakharov Environmental University, 2008. – № 3. PP. 115-119. **4.** *Popper K.* *An Evolutionary Epistemology // Evolutionary Theory: Paths into the Future* / Ed. by J. W. Pollard. John Wiley & Sons. Chichester and New York, 1984. – Ch. 10. – PP. 239-255. **5.** *Fogel D.B.* and *C.J. Robinson* (Eds) *Computational Intelligence: The Experts Speak*, John Wiley, New York, 2003. **6.** *Engelbrecht A.P.* *Computational Intelligence: An Introduction* // John Wiley, New York, 2003. **7.** *Heylighen F.* *The Global Superorganism: an evolutionary-cybernetic model of the emerging network society* // *Social Evolution & History*. – 2007. – № 1. – PP. 58-119. **8.** *Yushchenko A.G.* The logic of evolutionary megasynthesis and causation of global catastrophe : in the book «Emergencies» // *Proc. of Int. Conf. BSEC, May 2000, Kharkiv, Ukraine*. – P. 270-276. – in Russian. **9.** *Pierre Teilhard de Chardin* *Le phenomene humain* // Paris: Editions du Seuil, 1955. – 348 p. **10.** *Eremín A.L.* From the Individual's Intellect to the Intellect of Humanity // *Priroda* (RAN). – 2004. – No. 4. – PP. 23-28. – in Russian. **11.** Millimeter wave technology in wireless PAN, LAN, and MAN // *Xiao, Shao-Qiu et al.* // CRC Press, 2008. **12.** IEEE Std 802.15.3c-2009. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). Amendment 2: Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension. – IEEE, 12 October 2009. **13.** IEEE Std 802.15.3 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for HighRate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE, 29 September 2003. **14.** *Kharkevich A.A.* *Fundamentals of Radio Engineering*. – M.: State Publishing House of the literature on communication and radio, 1962. – 347 p. – in Russian. **15.** *Vishnevsky V., Frolov S., Shahnovich I.* Millimeter range as an industrial reality. The IEEE 802.15.3c standard and WirelessHD specification» // *Journal Electronica: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*. – 2010. – No 3. – PP. 70-78, – in Russian. **16.** *Xiao, Shao-Qiu et al.* Millimeter wave technology in wireless PAN, LAN, and MAN // CRC Press, 2008. – 436 p. **17.** *Yushchenko A. G.* Waveguide-Dielectric Filters Based on Leukosapphire and Quartz Monocrystals // *SPI's International Symposium on Voice, Video and Data Communications*. – Dallas, 1997. – Vol. 3232. – PP. 73-79. – doi:10.1117/12.301020. **18.** *Yushchenko A. G.* High Unloaded-Qs WDR Filters Designing // *International Journal of Infrared and Millimeters Waves*. – 2001. – Vol. 22, No. 12. – Pp. 1831-1836. – doi:10.1023/A:1015031802727. **19.** *Manidipa Nath* Review of Filter Techniques // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. – 2012. – Vol. 3, Iss. 3. – PP. 415-421. **20.** *Shusterov A., Yushchenko A.* Signal-Generator «MILLIDOC» for Resonance MM-wave Therapy // *The first All-Ukrainian Symposium «Physics and Engineering of MM- and Sub-MM waves» Proceeding*. – 1991. – Vol. 2. – P. 147. **21.** *Yushchenko A.G., Chizhov V.V.* Precision microwave testing of dielectric substrates // *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*. – Apr. 1997. – Vol. 46, Iss. 2. – PP. 507-510. **22.** *Yushchenko A.G.* Waveguide-junction test cells // *Precision Electromagnetic Measurements Digest*. – Washington, USA, 6-10 Jul. 1998. – PP. 538-539. **23.** *Yushchenko A.G., Chizhov V.V.* Integral method of nondestructive testing of optically transparent dielectric elements of band-pass filters // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. – Springer New York, June, 1993. – Vol. 14, num. 6. – PP. 1353-1366. **24.** *Yushchenko A.G.* Optical testing and annealing of the leukosapphire microwave resonators // *Microwaves and Radar, 1998*. – MİKON '98, 12th International Conference on 20-22 May 1998, Poland. – Vol. 2. – PP. 456-459. **25.** *Yushchenko A.G., Shibalkin S.F.* Electrodynamic Analysis of T-Shape Waveguide Junction Cells // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. – July 2005. – Vol. 26, num. 7. – PP. 991-100. **26.** *Yushchenko A.G., Mamedov D.B., Zaytsev D.M.* Intellectual CAD for Three-Tier Wide Band WDR Filters // *Int. on-line jour. Wireless Engineering and Technology*. – 2012. – Vol. 3, no. 1. – doi:10.4236/wet.2012.31005. **27.** *Yushchenko A.G., Mamedov D.B.* Comparative Characteristics of Bandpass Filters Based on WDR and Microstrip Resonators // *EEE*. – 2012. – Vol. 2, no. 2. **28.** *Yushchenko A. G., Mamedov D. B.* Ultra-wideband five-tier LM-mode filters optimized with knowledge-based CAD system // *Vistnyk NTU «KhPI»*. – 2013. – № 27. – PP. 169-179. **29.** *Yushchenko A. G., Mamedov D. B.* Intellectual CAD of Mm Waves WDR Filters With Increased Stop Band Attenuation // *Vistnyk NTU «KhPI»*. – 2012. – № 21. – PP. 238-245. **30.** *Yushchenko A. G. et al.* Microwave Filter // *Buluten Izobreteniy, Patent of Russia Federation № 2040080*, 1995. (in Russian). **31.** *Ilchenko M.E., Yushchenko A.G., Shibalkin S.F., Popov V.V.* Waveguide-dielectric Filters Based on Cross Shaped Waveguides // *Int. Conf. Millimeter and Submillimeter Waves and Applications, San Diego*. – 1994. – Vol. 2250. – PP. 571-572.

Appendix

Table 1 – Structural dimensions of the filters optimized by KB CAD system – 73.5 GHz

Filter Settings	Three-tier Filter	Five-tier Filter	Seven-tier Filter
Central frequency, GHz	73.5	73.5	73.5
Bandwidth, %	6.8	6.8	6.8
Regular waveguide width, mm	3.6	3.6	3.6
Cutoff waveguide width, mm	1.385	1.385	1.385
Waveguides height, mm	1.8	1.8	1.8
l_0 , mm	0.17	0.01	0.27
l_c , mm	0.3263	0.3813	0.3863
l_2 , mm	0.3863	0.3863	0.3863
l_3 , mm	-	0.3812	0.387
l_4 , mm	-	-	0.345
l_{23} , mm	-	1.318	1.446
l_{34} , mm	-	-	1.419
Filter length, mm	3.794	6.498	11.300
ε , leucosapphire	9.2	9.2	9.2

Table 2 – Structural dimensions of the filters optimized by KB CAD system – 83.5 GHz

Filter Settings	Three-tier Filter	Five-tier Filter	Seven-tier Filter
Central frequency, GHz	83.5	83.5	83.5
Bandwidth, %	6.0	6.0	6.0
Regular waveguide width, mm	3.6	3.6	3.6
Cutoff waveguide width, mm	1.241	1.241	1.241
Waveguides height, mm	1.8	1.8	1.8
l_0 , mm	0.12	0.01	0.3
l_c , mm	0.2383	0.3033	0.3033
l_2 , mm	0.2983	0.3033	0.3033
l_3 , mm	-	0.212	0.302
l_4 , mm	-	-	0.277
l_{23} , mm	-	1.225	1.407
l_{34} , mm	-	-	1.379
Filter length, mm	3.243	5.677	10.689
ε , leucosapphire	9.2	9.2	9.2

Надійшла (received) 11.03.2014

РЕФЕРАТИ

УДК 621.3.022:537.311.8:621.7.044.7

Трансформація електронних півхвиль в електричному ланцюзі з різнорідними металевими провідниками та імпульсним струмом великої щільності / М.И. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 3-11. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведені результати теоретичного дослідження зміни параметрів електронних півхвиль де Бройля у разі їх розповсюдження в одному електричному колі вздовж металевих провідників з різними довжинами і поперечними перерізами. Показано, що подібна трансформація параметрів дебройлівських електронних напівхвиль стосується як їх довжини, так і ширини «гарячих» подовжніх ділянок різнорідних провідників.

Ключові слова: електричне коло, металевий провідник, електрони, що дрейфують, імпульсний струм провідності, електронні півхвилі, характеристики подовжнього хвильового розподілу вільних електронів.

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Електрофільтрація різноімпедансних газових викидів в комплексній системі пилогазоочистки екологічно шкідливих промислових об'єктів / Л. З. Богуславський, Л. М. Мирошніченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 12-16. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Обґрунтовано необхідність використання для підвищення ефективності систем газоочистки додаткового різнорівневого імпульсного високовольтного високочастотного джерела живлення додатковими коронуючими електродами, що забезпечує пилогазоочистку різноімпедансних газових викидів екологічно небезпечних промислових об'єктів.

Ключові слова: електрофільтрація, високовольтне високочастотне імпульсне джерело живлення, комплексна система газоочистки, різноімпедансні газові викиди.

УДК 681.51: 537.528

Алгоритмічне та програмно-апаратне забезпечення моделювання адаптивних систем керування розрядноімпульсними технологіями / В. В. Діордійчук, С. С. Козирьв, Л. С. Овчиннікова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 17-22. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Розроблено програмно-апаратний інструментарій для моделювання та тестування адаптивних систем керування розрядноімпульсними технологіями з метою забезпечення надійності підтримки необхідних технологічних режимів в умовах стохастичності та невизначеності збурюючих впливів.

Ключові слова: розрядноімпульсні технології, адаптивна система керування, апаратні та програмні засоби, моделювання, тестування.

УДК 621.316.933.6:622.276.6

Дослідження стабільності роботи високовольтних газонаповнених некерованих розрядників електророзрядних заглибних установок / В.Г.Жекул, Ю.И.Мельхер, С.Г.Поклонов, А.П.Смирнов, И.С.Швец // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 23-31. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Досліджено високовольтні газонаповнені некеровані розрядники електророзрядних занурювальних установок. У результаті аналізу конструктивних особливостей розрядника виявлено причини, що призводять до нестабільності його характеристик: величини пробивної напруги (напруги спрацьовування). Запропоновано методику настроювання розрядника, що забезпечує умову малого діапазону розкиду напруги спрацьовування.

Ключові слова: високовольтний розрядник, електричний розряд, електророзрядна занурювальна установка.

УДК 621.315

Вибір основних вимог до електричних випробувань вітчизняних зразків кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену / В.М. Золотарев, Ю.А. Антонен, В.В. Золотарев, Р.В.Белянин, А.А. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 31-35. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

Виходячи з умови забезпечення необхідного ресурсу роботи 30 років для кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену на напругу 6...330 кВ проведено вибір параметрів їх основних електричних випробувань. Наведено вимоги європейських стандартів (IEC / CENELEC), стандартів Росії, а також стандартів США за рівнем випробувальної напруги, часу його подачі до випробуваних зразків кабелів із ізоляцією із зшитого поліетилену. На підставі міжнародних стандартів встановлені норми випробувань високовольтних кабелів, що випускаються ПАТ «Завод Південкабель», Україна.

Ключові слова: силовий кабель, зшитий поліетилен, електричні випробування.

УДК 621.315

Вимірювання рівня часткових розрядів нових типів силових кабелів / В.М. Золотарев, С.Ю. Антонен, В.В. Золотарев, С.В. Бузько, А.А. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 36-42. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

Наведені результати досліджень з розробки вимірювань рівня часткових розрядів силових кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену. Розроблено пристрої для випробувань електричною напругою до 500 кВ силових кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену. Розглянуто особливості практичного застосування різних методів до виміру часткових розрядів в силових кабелях, які відрізняються великою електричною смістю. Наведені результати первинних вимірювань рівня часткових розрядів в розроблених ПАТ «Завод Південкабель» кабелях з ізоляцією із зшитого поліетилену на напругу до 300 кВ.

Ключові слова: силовий кабель, зшитий поліетилен, часткові розряди.

УДК 621.315

Вітчизняні типи пожегобезпечних кабелів розробки ПАО «Завод «Южкабель» і вимоги, що пред'являються до них / В.М. Золотарев, Т.Ю. Антонен, В.П. Карпушенко, А.А. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 42-50. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

Наведені основні напрямки розробок пожегобезпечних силових кабелів і проводів, а також вимоги до них з пожежної безпеки. Розроблено кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену що не поширюють горіння з низьким димогазовиділенням, та не містять галогенів; вогнетривкі кабелі, що містять бар'єр зі смоляної стрічки, що витримують температуру не менш ніж 700С. Продукція, що випускається ПАТ «Завод Південкабель» відповідає вимогам українських стандартів з пожежної безпеки.

Ключові слова: силові кабелі, зшитий поліетилен, пожегобезпека.

УДК 621.315

Вплив провідності екранів на діелектричні втрати в кабелях / В.М.Золотарев, В.В.Золотарев, С.В.Бузько, Т.Ю.Антонен, А.А.Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 50-54. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Виведена залежність діелектричних втрат від провідності екранів в силових кабелях. Типовою конструкцією сучасних кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену є коаксіальна конструкція типу «провідний екран з полімеру - ізоляція із зшитого поліетилену, другий - провідний екран з полімеру». Встановлено залежність тангенса кута діелектричних втрат від провідності.

Ключові слова: силовий кабель, діелектричні втрати, ізоляція.

УДК 621.319.53

Трансформатор з індуктивним накопичувачем енергії / В. М. Іванов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 55-60. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто схему імпульсного трансформатора, що використовується як індуктивний накопичувач енергії. Проаналізовано режим роботи трансформатора, розраховані параметри імпульсу напруги на навантаженні, к.к.д. запасання енергії.

Ключові слова: індуктивний накопичувач енергії, імпульсний трансформатор, форма імпульсу, імпульс високої напруги.

УДК 004.912

Система підготовки бібліографічних описів згідно міжнародним стандартам / О.В. Касілов, А.В. Суботіна // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 60-65. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Система підготовки бібліографічних описів згідно міжнародним стандартам призначена для створення бібліографічних описів в APA, MLA, Гарвардському стилі оформлення, розроблені принципи складання та алгоритм перетворення бібліографічних описів з ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 до міжнародних стандартів на прикладі книг та статей у журналах. Досліджено структури бібліографічних описів різних стандартів. Призначена для використання авторами наукових робіт (студентами, аспірантами, викладачами) або будь-якими іншими особами, які займаються аналітико-синтетичною переробкою інформації.

Ключові слова: система підготовки, бібліографічний опис, міжнародний стандарт, APA, MLA, Гарвардський стиль, ДСТУ ГОСТ 7.1:2006.

УДК 621.316.363

Пристрій блокування оперативних перемикачів (ПБОП) комплексу електрообладнання нового покоління / Г.М. Колнушко, О.С. Недзельский, Е.Г. Понуждаєва, Р.К. Борисов, С.И. Хренов, Д.И. Ковалев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 66-71. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

В статті подані основні технічні характеристики, кінематична та електрична схеми пристрою блокування оперативних переключень (ПБОП) комутуючих апаратів високої напруги енергооб'єктів. Розроблений зразок ПБОП має ряд переваг у порівнянні з аналогами і може застосовуватись у комплексах електрообладнання оперативних блокувань безпечності нового покоління з «інтелектуальною» схемою керування.

Ключові слова: пристрій блокування, кінематична схема, електрична схема, оперативні переключення.

УДК 621.391.825

Інженерна методика визначення імпульсної напруги і струмів, що наводяться на міжелементних з'єднаннях друкованої плати при дії імпульсного електромагнітного поля / А.И.Коробко, З.И.Коробко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 71-78. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Розроблена інженерна методика визначення імпульсних напруг та струмів, наведених на компонентах радіоелектронних схем, з'єднаних печатними провідниками, що містить у собі графічне імітаційне моделювання та розрахункові методи кінцево-від'ємного типу. Наведено приклад реалізації розробленої методики для імпульсного електромагнітного поля субнаносекундного діапазону.

Ключові слова: імпульсне електромагнітне поле, радіоелектронна схема, провідники, печатна плата, наведені імпульсні струми та напруги.

УДК 621.318

Вплив зовнішніх електромагнітних факторів на хвилеводні характеристики напівпровідникових комплектуючих електрорадіовиробів / В.І. Кравченко, А. І. Коробко, І. В.

Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 79-83. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Визначено механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових структур, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього ЕМВ. Показано, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на електровироби часто супроводжується виникненням струмів у провідних елементах ЕРВ і утворенням їх внутрішніх полів.

Ключові слова: власні коливання, напівпровідникові структури, імпульсне електромагнітне випромінювання.

УДК 621.318

Механізми відмов напівпровідникових комплексуючих електрорадіовиробів при дії зовнішнього електромагнітного випромінювання / В. І. Кравченко, І. В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 84-87. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Встановлено, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання на електрорадіовироби супроводжується виникненням струмів у провідних елементах виробів та утворенням їх внутрішніх полів. Розроблено методи визначення механізмів власних коливань напівпровідникових структур, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього електромагнітного випромінювання.

Ключові слова: електромагнітне випромінювання, напівпровідникові структури.

УДК 621.319.4

Параметричні відмови конденсаторів СМА-166/3-14 в південно-західній електроенергосистемі / Лабзун М.П., Лежнюк П.Д., Рубаненко А.Е., Рудаков В.В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 88-96. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведені результати дослідження та причини погіршення ізоляційних якостей та показників надійності високовольтних конденсаторів зв'язку СМА-166/√3 – 14УХЛ1.

Ключові слова: високовольтний конденсатор зв'язку, показники надійності, поліпропиленова ізоляція, трансформаторне масло.

УДК 621.317.3

Вимірювання емісії струмів радіоперешкод від бортового авіаційного обладнання / Ю.С.Немченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 96-107. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

Описано сучасну методіку вимірювання емісії струму радіозавод від бортового авіаційного обладнання за допомогою струмоз'ємника ТС-А, створеного та прокаліброваного у Випробувальній лабораторії НДПКІ «Молнія». Ця методіка дозволяє реалізувати вимоги до вимірювання таких струмів за всіма діючими в Україні нормативними документами у повному обсязі.

Ключові слова: емісія струму радіозавод, струмоз'ємник, бортове авіаційне обладнання.

УДК 621.317.3

Генератор для випробувань БАО на сприйнятливість до перехідних процесів, викликаних блискавкою («багаторазові удари») ПЛА-МКУ-2 / Ю.С.Немченко, В.В.Князев, И.П.Лесной, С.Б.Сомхив // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 108-114. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Описано конструкцію та результати атестації генератора, призначеного для випробувань бортового авіаційного обладнання на сприйнятливість до перехідних процесів, викликаних блискавкою «багаторазові удари», відповідно до вимог міжнародних стандартів. Генератор виробляє циклограми імпульсів напруги форми 2 по 5-х рівнях іспитів, випробування проводяться методом «кабельної інжекції».

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

УДК 551.594.221

Імовірність появи вражаючого розряду блискавки в районі розташування стрижневого об'єкта / О. О. Петков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 115-121. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

У статті запропоновані співвідношення для визначення функції й щільності розподілу радіус-вектора й кута проєкцій точок початку фінальних розрядів блискавок, що уражають стрижневі об'єкти.

Ключові слова: розряд блискавки, функція розподілу, щільність розподілу.

УДК 621.31.048.015

Вимірювання s-параметрів оптичного СВЧ тракту AFBR-1310/AFBR-2310 на принципі імпульсної рефлектометрії / І.О.Постільник // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 122-130. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0740.

Описані характерні особливості методу дослідження СВЧ ланцюгів за допомогою S-параметрів. Наведені приклади вимірювання та визначення характеру ланцюга на основі імпульсної рефлектометрії. За допомогою імпульсної рефлектометрії проведено аналіз вхідного ланцюга волоконно-оптичного СВЧ тракту. Визначено коефіцієнт передачі тракту.

Ключові слова: СВЧ, волоконно-оптичний, S-параметри, імпульсна рефлектометрія, коефіцієнт передачі.

УДК 621.313: 621.762: 537.52: 535.421

Автоматизація процесу вимірювання температури, струму і напруги при іскроплазмовому спіканні дисперсних композицій / О.М. Сизоненко, В.В. Литвинов, С.В. Конотоп, О.О. Коваленко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 130-140. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-0740.

У даній роботі за допомогою графічної середовища програмування LabVIEW розроблено програму автоматизації процесу вимірювання параметрів (температури, струму та напруги) іскроплазмового спікання дисперсних композицій, виконано її тестування і проведено випробування в умовах реального експерименту. Встановлено, що програма дозволяє відслідковувати хід процесу спікання в режимі реального часу для його контролю і, за потребою, коригування, а також знижує трудомісткість процесу вимірювання.

Ключові слова: іскроплазмове спікання, середовище розробки, алгоритм, програма, температура, струм, напруга.

УДК 621.314.5:537.523:661.666.4

Стабілізація та регулювання режимних параметрів високовольтної електророзрядної системи для електроімпульсного синтезу нановуглецю / А. А. Шерба, Д. В. Вінниченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 141-151. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

Розроблено теоретичні засади стабілізації та регулювання режимних параметрів високовольтної електророзрядної системи для нової технології електроімпульсного синтезу нановуглецю. Реалізовано принципи побудови електророзрядної системи зі стабілізацією імпульсного струму при багатократному змінненні вихідної напруги електророзрядної системи.

Ключові слова: електротехнічна система, іскровий розряд, імпульсний струм, стабілізація, резонанс, інвертор напруги, синтез нановуглецю

УДК 004.93'12

Дослідження роботи перцептронів як зростаючої нейромережі для вирішення задачі розпізнавання символів / Ющенко О.Г., Суботіна А.В., Захожасва Т.В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 152-158. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведено дослідження роботи перцептрона для вирішення задачі розпізнавання символів. Обрана й обґрунтована структура нейронної мережі, показана можливість поліпшення властивостей узагальнення шляхом нарощування її структури, проаналізовано роботу перцептрона при розпізнаванні не лише двох, але і чотирьох букв, а також букв різного накреслення.

Ключові слова: перцептрон, розпізнавання, символ, зростаюча нейронна мережа.

УДК 007: 159.955:519.768: 621.372.852: 621.372.413

Еволюційне проектування семіланкових фільтрів з LM-модами оптимізованих оригінально інтелектуальною САПР / А. Г. Ющенко, Д. В. Мамедов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 159-170. – Бібліогр.: 31 назв. – ISSN 2079-0740.

Запропонована і протестована еволюційна стратегія конструювання багатоланкових ХДР-фільтрів з LM-модами, оптимізованих оригінальною САПР. Суть цієї стратегії полягає у вирішенні проблеми синтезу та оптимізації семи (або більше) ланкових фільтрів через поступове ускладнення найпростішої одноланкової конструкції, яке відповідає еволюційному принципу вартісної функції. Ефективність стратегії підтверджується проектування від трьох до п'яти і сімиланкових міліметрових фільтрів, які призначені для наступного покоління міліметрового діапазону бездротових систем і відповідає останнім стандартам, як ECMA-387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c і IEEE 802.11ad.

Ключові слова: еволюційні стратегії, інтелектуальна САПР, фільтри з LM-модами, WirelessHD, IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11ad.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.3.022:537.311.8:621.7.044.7

Трансформация электронных полувольт в электрической цепи с разнородными металлическими проводниками и импульсным током большой плотности / М.И. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 3-11. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведены результаты теоретического исследования изменения параметров электронных полувольт де Бройля в случае их распространения в одной электрической цепи вдоль металлических проводников с различными длинами и поперечными сечениями. Показано, что подобная трансформация параметров дебройлевских электронных полувольт касается как их длины, так и ширины «горячих» продольных участков разнородных проводников.

Ключевые слова: электрическая цепь, металлический проводник, дрейфующие электроны, импульсный ток проводимости, электронные полувольты, характеристики продольного волнового распределения свободных электронов.

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Электрофилтрация разноимпедансных газовых выбросов в комплексной системе пылегазоочистки экологически опасных промышленных объектов / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 12-16. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Обоснована необходимость использования для повышения эффективности систем газоочистки дополнительного разноуровневого импульсного высоковольтного высокочастотного источника питания с дополнительными коронирующими электродами, обеспечивающего пылегазоочистку разноимпедансных газовых выбросов экологически опасных промышленных объектов.

Ключевые слова: электрофильтрация, высоковольтный высокочастотный импульсный источник питания, комплексная система газоочистки, разномпедансные газовые выбросы.

УДК 681.51: 537.528

Алгоритмическое и аппаратно-программное обеспечение моделирования адаптивных систем управления разрядноимпульсными технологиями / В. В. Диордийчук, С. С. Козырев, Л. Е. Овчинникова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 17-22. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Разработан аппаратно-программный инструментарий для моделирования и тестирования адаптивных систем управления разрядноимпульсными технологиями с целью обеспечения надежности поддержания необходимых технологических режимов в условиях стохастичности и неопределенности возмущающих воздействий.

Ключевые слова: разрядноимпульсные технологии, адаптивная система управления, аппаратные и программные средства, моделирование, тестирование.

УДК 621.316.933.6:622.276.6

Исследования стабильности работы высоковольтных газонаполненных неуправляемых разрядников электроразрядных погружных установок / В.Г.Жекул, Ю.И.Мельхер, С.Г.Поклонов, А.П.Смирнов, И.С.Швец // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 23-31. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Исследованы высоковольтные газонаполненные неуправляемые разрядники электроразрядных погружных установок. В результате анализа конструктивных особенностей разрядника выявлены причины, приводящие к нестабильности его характеристик: величины пробивного напряжения (напряжения срабатывания). Предложена методика настройки разрядника, обеспечивающая условие малого диапазона разброса напряжения срабатывания.

Ключевые слова: высоковольтный разрядник, электрический разряд, электроразрядная погружная установка.

УДК 621.315

Выбор основных требований к электрическим испытаниям отечественных образцов кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / В.М. Золотарев, Ю.А. Антонен, В.В. Золотарев, Р.В.Белянин, А.А. Науменко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 31-35. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

Исходя из условия обеспечения необходимого ресурса работы 30 лет для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6...330 кВ проведен выбор параметров их основных электрических испытаний. Приведены требования европейских стандартов (IEC/CENELEC), стандартов России, а также стандартов США по урону испытательного напряжения, времени его приложения к испытуемым образцам кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. На основании международных стандартов установлены нормы испытаний высоковольтных кабелей, выпускаемых ПАО «Завод Южкабель», Украина.

Ключевые слова: силовой кабель, сшитый полиэтилен, электрические испытания.

УДК 621.315

Измерение уровня частичных разрядов новых типов силовых кабелей / В.М. Золотарев, С.Ю. Антонен, В.В. Золотарев, С.В. Бузько, А.А. Науменко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 36-42. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведены результаты исследований по разработке измерений уровня частичных разрядов силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Разработаны устройства испытаний электрическим напряжением до 500 кВ силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Рассмотрены особенности практического применения различных методов к измерению частичных

разрядов в силовых кабелях, которые отличаются большой электрической емкостью. Приведены результаты первичных измерений уровня частичных разрядов в разработанных ПАО «Завод Южкабель» кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 300 кВ.

Ключевые слова: силовой кабель, сшитый полиэтилен, частичные разряды.

УДК 621.315

Отечественные типы пожаробезопасных кабелей разработки ПАО «Завод «Южкабель» и требования, предъявляемые к ним / В.М. Золотарев, Т.Ю. Антонен, В.П. Карпушенко, А.А. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 42-50. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведены основные направления разработок пожаробезопасных кабелей и проводов, а также требования к ним по пожарной безопасности. Разработаны кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена не распространяющие горение с низким дымогазовыделением, не содержащие галогенов; огнестойкие кабели, содержащие барьер из смоляной ленты, выдерживающие температуру не менее 700С. Выпускаемая ПАО «Завод Южкабель» кабельная продукция соответствует требованиям украинских стандартов по пожарной безопасности.

Ключевые слова: силовые кабели, сшитый полиэтилен, пожаробезопасность.

УДК 621.315

Влияние проводимости экранов на диэлектрические потери в кабелях / В.М.Золотарев, В.В.Золотарев, С.В.Бузько, Т.Ю.Антонен, А.А.Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 50-54. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Введена зависимость диэлектрических потерь от проводимости экранов в силовых кабелях. Типовой конструкцией современных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена является коаксиальная конструкция типа «проводящий экран из полимера - изоляция из сшитого полиэтилена, второй - проводящий экран из полимера». Установлена зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от проводимости.

Ключевые слова: силовой кабель, изоляция, диэлектрические потери.

УДК 621.319.53

Трансформатор с индуктивным накоплением энергии / В. М. Иванов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 55-60. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрена схема импульсного трансформатора используемого в качестве индуктивного накопителя энергии. Проанализирован режим работы трансформатора, рассчитаны параметры импульса напряжения на нагрузке, к.п.д. запасаения энергии.

Ключевые слова: индуктивный накопитель энергии, импульсный трансформатор, форма импульса, импульс высокого напряжения.

УДК 004.912

Система подготовки библиографических описаний согласно международным стандартам / Касилов О.В., Субботина А.В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 60-65. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Система подготовки библиографических описаний согласно международным стандартам предназначена для создания библиографических описаний в APA, MLA, Гарвардском стилях оформления, разработаны принципы составления и алгоритм преобразования библиографических описаний с ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 в международные стандарты на примере книг и статей в журналах. Исследованы структуры библиографических описаний разных стандартов. Предназначена для использования авторами научных работ (студентами, аспирантами, преподавателями) или другими лицами, занимающимися аналитико-синтетической переработкой информации.

Ключевые слова: система подготовки, библиографическое описание, международный

УДК 621.316.363

Устройство блокировки оперативных переключений (УБОП) комплекса электрооборудования нового поколения / Г.М. Колишко, О.С. Недзельский, Е.Г. Понуждаева, Р.К. Борисов, С.И. Хренов, Д.И. Ковалев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 66-71. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

В статье представлены основные технические характеристики, кинематическая и электрическая схемы устройства блокировки оперативных переключений (УБОП) коммутирующих аппаратов высокого напряжения энергообъектов. Разработанный образец УБОП имеет ряд преимуществ по сравнению с аналогами и может использоваться в комплексах электрооборудования оперативных блокировок безопасности нового поколения с «интеллектуальной» схемой управления.

Ключевые слова: устройство блокировки, кинематическая схема, электрическая схема, оперативные переключения.

УДК 621.391.825

Инженерная методика определения импульсных напряжений и токов, наводимых на межэлементных соединениях печатной платы при воздействии импульсного электромагнитного поля / А.И.Коробко, З.И.Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 71-78. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Разработана инженерная методика определения импульсных напряжений и токов, наводимых на компонентах радиоэлектронных схем соединенных печатными проводниками, сочетающая графическое имитационное моделирование с расчетными методами конечно – разностного типа. Приведен пример реализации разработанной методики для импульсного электромагнитного поля субнаносекундного диапазона.

Ключевые слова: импульсное электромагнитное поле, радиоэлектронная схема, проводники, печатная плата, наведенные импульсные токи и напряжения.

УДК 621.318

Влияние внешних электромагнитных факторов на волноводные характеристики полупроводниковых комплекствующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, А. И. Коробко, И. В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 79-83. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых структур в условиях воздействия электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ) на электрорадиоизделия часто сопровождаются появлением токов в проводящих элементах изделий и появлением внутренних полей.

Ключевые слова: собственные колебания, полупроводниковые структуры, импульсное электромагнитное излучение.

УДК 621.318

Механизмы отказов полупроводниковых комплекствующих электрорадиоизделий при воздействии внешнего электромагнитного излучения / В. И. Кравченко, И. В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 84-87. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Определены механизмы генерации колебаний полупроводниковых структур, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях воздействия стороннего электро-

магнитного излучения.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, полупроводниковые структуры.

УДК 621.319.4

Параметрические отказы конденсаторов СМА-166/3-14 в юго-западной электроэнергосистеме / Лабзун М.П., Лежнюк П.Д., Рубаненко А.Е., Рудаков В.В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 88-96. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведены результаты исследования и причин ухудшения изоляционных свойств и показателей надежности высоковольтных конденсаторов связи СМА-166/ $\sqrt{3}$ – 14УХЛ1.

Ключевые слова: высоковольтный конденсатор связи, показатели надежности, полипропиленовая изоляция, трансформаторное масло.

УДК 621.317.3

Измерение эмиссии токов радиопомех от бортового авиационного оборудования / Ю.С.Немченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 96-107. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

Описана современная методика измерения эмиссии тока радиопомех от бортового авиационного оборудования с помощью токосъемника ТС-А, созданного и прокалиброванного в Испытательной лаборатории НИПКИ «Молния». Эта методика позволяет реализовать требования к измерению таких токов по всем действующим в Украине нормативным документам в полном объеме.

Ключевые слова: эмиссия тока радиопомех, токосъемник, бортовое авиационное оборудование.

УДК 621.317.3

Генератор для испытаний БАО на восприимчивость к переходным процессам, вызванных молнией («многократные удары») ИГЛА-МКУ-2 / Ю.С.Немченко, В.В.Князев, И.П.Лесной, С.Б.Сомхив // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 108-114. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Описана конструкция и результаты аттестации генератора, предназначенного для испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией «многократные удары», в соответствии с требованиями международных стандартов. Генератор производит циклограммы импульсов напряжения формы 2 по 5-ти уровням испытаний, испытания проводятся методом «кабельной инъекции».

Ключевые слова: испытание, бортовое оборудование, невосприимчивость, молния, переходные процессы, генератор, аттестация.

УДК 551.594.221

Вероятность появления поражающего разряда молнии в районе расположения стержневого объекта / А. А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 115-121. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

В статье предложены соотношения для определения функции и плотности распределения радиус-вектора и угла проекций точек начала финальных разрядов молний, поражающих стержневые объекты.

Ключевые слова: разряд молнии, функция распределения, плотность распределения.

УДК 621.31.048.015

Измерения s-параметров оптического СВЧ тракта AFBR-1310/AFBR-2310 на принципе импульсной рефлектометрии / И.О.Постильник // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 122-130. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0740.

Описаны характерные особенности метода исследования СВЧ цепей с помощью S-параметров. Приведены примеры измерения и определения характера цепи на основе импульсной рефлектометрии. С помощью импульсной рефлектометрии проведен анализ входной цепи волоконно-оптического СВЧ тракта. Определен коэффициент передачи тракта.

Ключевые слова: СВЧ, волоконно-оптический, S-параметры, импульсная рефлектометрия, коэффициент передачи.

УДК 621.313: 621.762: 537.52: 535.421

Автоматизация процесса измерения температуры, тока и напряжения при искроплазменном спекании дисперсных композиций / О.Н. Сизоненко, В.В. Литвинов, С.В. Коротоп, А.А. Коваленко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 130-140. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-0740.

В данной работе с помощью графической среды программирования LabVIEW разработана программа автоматизации процесса измерения параметров (температуры, тока и напряжения) искроплазменного спекания дисперсных композиций, выполнено ее тестирование и проведена апробация в условиях реального эксперимента. Установлено, что программа позволяет отслеживать ход процесса спекания в режиме реального времени для его контроля и, по необходимости, корректировки, а также снижает трудоемкость процесса измерения.

Ключевые слова: искроплазменное спекание, среда разработки, алгоритм, программа, температура, ток, напряжение.

УДК 621.314.5:537.523:661.666.4

Стабилизация и регулирование режимных параметров высоковольтной электроразрядной системы для электроимпульсного синтеза нанопуглерода / А. А. Щерба, Д. В. Винниченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 141-151. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

Разработаны теоретические основы стабилизации и регулирования режимных параметров высоковольтной электроразрядной системы для новой технологии электроимпульсного синтеза нанопуглерода. Реализованы принципы построения электроразрядной системы с стабилизацией импульсного тока при многократном изменении выходного напряжения электроразрядной системы.

Ключевые слова: электротехническая система, искровой разряд, импульсный ток, стабилизация, резонанс, инвертор напряжения, синтез нанопуглерода.

УДК 004.93'12

Исследование перцептрона как растущей нейросети для решения задачи распознавания символов / А.Г. Ющенко, А.В. Субботина, Т.В. Захожаева // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 152-158. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведено исследование работы перцептрона для решения задачи распознавания символов. Выбрана и обоснована структура нейронной сети, показана возможность улучшения свойств обобщения путем наращивания ее структуры, проанализирована работа перцептрона при распознавании не только двух, но и четырех букв, а также букв различного начертания.

Ключевые слова: перцептрон, распознавание, символ, растущая нейронная сеть.

УДК 007: 159.955:519.768: 621.372.852: 621.372.413

Эволюционное проектирование семизвонных фильтров с LM-модами оптимизированных оригинальной интеллектуальной САПР / А. Г. Ющенко, Д. В. Мамедов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 159-170. – Бібліогр.: 31 назв. – ISSN 2079-0740.

Предложена и протестирована эволюционная стратегия конструирования многозвонных ВДР - фильтров с LM- модами, оптимизированных оригинальной САПР. Суть этой стратегии заключается в решении проблемы синтеза и оптимизации семи (или более) звонных фильтров

через постепенное усложнение простейшей – однозвенной конструкции, которое соответствует эволюционному принципу стоимостной функции. Эффективность стратегии подтверждается проектирования от трех до пяти и семизвенных миллиметровых фильтров, которые предназначены для следующего поколения беспроводных систем миллиметрового диапазона и соответствует последним стандартам таким, как ECMA - 387, WirelessHD, IEEE 802.15.3с и IEEE 802.11ad.

Ключевые слова: эволюционные стратегии, интеллектуальная САПР, фильтры с LM- модами, WirelessHD, IEEE 802.15.3с, IEEE 802.11ad.

ABSTRACTS

Transformation of half-waves in the electronic circuit with dissimilar metallic conductors and high pulse current density / M.I Baranov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 3-11. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

The results of theoretical research of change of parameters of electronic semiwaves are resulted de Broilya in the case of their distribution in one electric chain along metallic explorers with different lengths and by cross runners. It is shown that this transformation parameters of de Broglie waves of electronic semi waves regard as their lengths and widths of the "hot" longitudinal portions dissimilar conductors.

Key words: electric chain, metallic explorer, drifting electrons, impulsive current of conductivity, electronic semiwaves, descriptions of the longitudinal wave distributing of lone electrons.

Electrical filtration of different impedance gas exhausts in a complex system of coal and cleaning of ecologically dangerous industrial objects / L. Z. Boguslavsky L. N. Myroshnychenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 12-16. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-0740.

It is described high voltage high power pulse current generator creation applied for electropulse installations. The necessity of the use of the additional different impedance pulse high-voltage high-frequency power source with additional coronating electrodes providing the coal and gas cleaning of different impedance gas exhausts from ecologically dangerous industrial objects is validated for the higher efficiency of the gas cleaning systems. This action enables the intensification of the gas cleaning process and the 40-fold increase of the power supplied to the electrical filter.

Key words: Electrical filtration, high-voltage high-frequency pulse power source, complex system of gas cleaning, different impedance gas exhausts high voltage high frequency pulse current generator, high voltage charge processes.

Algorithms and hardware-software solution for simulation of adaptive control systems for discharge-pulse technologies / V. V. Diordiychuk, S. S. Kozyrev, L. E. Ovchinnikova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 17-22. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-0740.

Hardware-software solution was developed for simulation and testing of adaptive control systems for discharge-pulse technologies. This solution provides reliable support of required technological process parameters under variable conditions.

Keywords: discharge-pulse technologies, adaptive control system, hardware-software systems, simulation, testing.

Study of the stable operation of the high-voltage gas-filled noncontrollable dischargers of the electrodischarge immersion installations / V.G.Zhekul, Ju.I.Melher, S.G.Poklonov,

A.P.Smirnoff, I.S.Shvec // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 23-31. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-0740.

The high-voltage gas-filled noncontrollable dischargers of the electrodischarge immersion installations are featured in this study. As a result of the analysis of design features of the dischargers the causes are detected which influence the instability of its characteristics: the breakdown voltage value (response voltage). The method of adjusting the discharger to meet the condition of the small range of response voltage spreading is suggested herein.

Key words: high-voltage discharger, electric discharge, electrodischarge immersion installation.

Selection main demands for electric testing cable with XLPE insulation / Zolotaryov V.M., Antonyetz T.U., Zolotaryov V.V., Belyanin R.V., Naymenko A.A. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 31-35. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-0740.

For cable 6 ... 330 kV with XLPE insulation carried out selection of main electric tests for guarantee 30 years using. The requirements of European standards (IEC / CENELEC), the standards of Russia, as well as USA standards on the level of the test voltage, the time of its application to test samples of cables with XLPE insulation are shown. Based on international standards set standards testing high-voltage cables, produced by PJSC «Stock company Yuzhcable», Ukraine.

Key words: power cable, XLPE, electric testing.

Measurement partial discharges new type power cables / Zolotaryov V.M., Antonetz S.U., Zolotaryov V.V., Buzko S.V., Naumenko A.A. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 36-42. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-0740.

The results of researches for measurement partial discharges in XLPE – insulation of power cable are presented. Testing device designed electric voltage up to 500 kV power cables with XLPE insulation. The features of the practical application of various methods to measure partial discharges in power cables, which feature large capacitance. The results of the primary measurement of partial discharges in developed PJSC "Stock company Yuzhcable" cables with XLPE insulation voltage up to 300 kV.

Key words: power cable, XLPE, part discharges.

Ukrainian»s type of fire resistant stock company «Zavod Yushcable» cable and main demands for them / V.M.Zolotaryov, T.U.Antonyetz, V.P.Karpushenko, A.A.Naumenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 42-50. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-0740.

The main demands and directions of designing fire resistant power wire and cable are presented. Developed cables with XLPE insulation flame retardant, low smoke and gas emission, halogen; fire resistant cables containing barrier resin tape that can withstand temperatures of up to 700C. Let PJSC "Stock company Yuzhcable" products meet Ukrainian standards for fire safety.

Key words: power cable, XLPE, fire resistance.

Dependence of dissipation factor from conduction of power cable screens are presented / V.M.Zolotaryov, V.V.Zolotaryov, S.V.Buzko, T.U.Antonetz, A.A.Naumenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 50-54. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-0740.

Influence of conduction of screens up on cable dissipation factor. Typical design of modern cables with XLPE is coaxial design of the "conductive polymer shield - XLPE insulation, the second - a conductive polymer shield." The dependence of the dielectric loss tangent of the conductivity.

Key words: power cable, dissipation factor, insulation.

Transformer with an inductive energy storage / VM Ivanov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 55-60. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-0740.

The scheme of the pulse transformer is used as an inductive energy storage. Analyzed the operation of the transformer, pulse parameters calculated load voltage, efficiency energy storage.

Keywords: inductive energy storage, pulse transformer, pulse shape, a high voltage pulse.

The system of bibliographic descriptions preparation according to international standards / Kasilov O.V., Subotina A.V. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 60-65. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

The system of bibliographic descriptions preparation according to international standards is intended for creating bibliographic descriptions APA, MLA, Harvard styles, principles of compiling and the algorithm of bibliographic descriptions conversion from State Standard 7.1:2006 into international standards on examples of books and journal articles are developed. The structures of bibliographic descriptions of different standards are explored. Designed to use by authors of scientific works (students, PhD students, teachers, professors) or any other persons, who involves in analytical and synthetic information processing.

Keywords: preparation system, bibliographic description, international standard, APA, MLA, Harvard style, State Standard 7.1:2006.

The blocking devise (BSD) for operative commutations in the equipments of new age electrotechnical systems / G. M. Koliushko, O. S. Nedzelskyi, H. G. Ponuzhdayeva, R. K. Borisov, S. I. Khrenov, D. I. Kovalev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 66-71. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-0740.

The main technical characteristics, kinematics design and electrical circuits of the blocking safety device (BSD) for the high voltage commutation equipments of the energetic objects are presented in this article. Experimental model BSD has some preferences compare to analogues and may be used in the operative BSD with new age "intellectual" system of control.

Keywords: blocking safety device; kinematics design; electrical circuits; operative commutation.

Engineering technique of definition of pulse voltage and the currents directed on components of radio-electronic circuits connected printed conductors / A.I.Korobko, Z.I.Korobko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 71-78. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

The engineering technique of definition of pulse voltage and the currents directed on components of radio-electronic circuits connected printed conductors, combining graphic imitating modeling with settlement methods certainly difference-type is developed. The example of realization of the developed technique for a pulse electromagnetic field subnanosecond a range is resulted.

Key words: a pulse electromagnetic field, the radio-electronic circuit, conductors, the printed-circuit-board, the induced pulse currents and voltage.

Influence of external factors on electromagnetic waveguide characteristics of semiconductor components of the electric radio devices / V.I. Kravchenko, A. I. Korobko, I. V. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 79-83. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

The power losses of the flow of charged particles caused by such an interaction due to excitation of surface polaritons in the semiconductor structure have been determined. The influence of pulsed electromagnetic radiation on electric radio apparatus is often accompanied by currents arcing on inner current – conducting elements as well as by the distortion of their internal fields.

Key words: semiconductor structure, pulsed electromagnetic radiation.

Failure mechanism of semiconductor components under the influence of external electrical radio electromagnetic radiation / V. I. Kravchenko, I. V. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 84-87. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

The influence of pulsed electromagnetic radiation on electric radio apparatus is often accompa-

nied by currents arcing on inner current – conducting elements as well as by the distortion of their internal fields. The power losses of the flow of charged particles caused by such an interaction due to excitation of surface polaritons in the semiconductor superstructure have been determined.

Key words: electromagnetic radiation, semiconductor superstructure.

Self-reactance refuses of capacitors of CMA - 166/ 3-14 in the south-west electropower system of Ukraine / Labzun M.P., Leggnuk P.D., Rubanenko A.E., Rudakov V.V. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 88-96. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0740.

The results of research and reasons of worsening of isolating properties and indexes of reliability of high-voltage capacitors of connection CMA-166/√3 – 14YXJ11 are brought.

Key words: high-voltage capacitor of connection, reliability indexes, polipropilen isolation, transformer oil.

Measuring of emission of currents of radio interferences from the on-board aircraft equipment / Y.S.Nemchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 96-107. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-0740.

Modern methodology of measuring of emission of current of radio interferences is described from the on-board aircraft equipment by means of current monitoring transformer TC-A, created and calibrated in the Test laboratory of Research & Design Institute «Molniya». This methodology allows realizing requirements to measuring of such currents on all operating in Ukraine normative documents in full.

Keywords: emission of current of radio interferences, current monitoring transformer, on-board aircraft equipment.

Generator intended for testing of the BAO on susceptibility to fast transient/burst, caused lightning ("multiple strokes") IGLA-MKU-2 / Y.S.Nemchenko; V.V.Kniyaziev, I.P. Lesnoy; S.B.Somhiev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 108-114. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-0740.

The construction and the testing of the attestation of the generator intended for testing of the on-board aircraft equipment on susceptibility to fast transient/burst, caused lightning "multiple strokes", according to International standards are described. The apparatus generates the mission profile of the test voltage of the form 2 on five levels, test are conducted by method "Cable injection".

Keywords: test, on-board aircraft equipment, susceptibility, lightning, transients, generator, attestation.

Probability of the appearance of lightning striking in the area of a stick object / A.A. Petkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 115-121. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

In the article, a relation for the function and density distribution of the radius vector and the projection angle of the entry points of final projections lightning hitting core objects is suggested.

Keywords: lightning bolt, distribution function, density of distribution.

Measurement of s-parameters of microwave optical path AFBR-1310/AFBR-2310 in principle, Tzipi impulsnoy reflectometry / I.O.Postilnyk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 122-130. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0740.

Describes the characteristics of microwave circuits' research method using S-parameters. The examples of measurements and determine the nature of the circuit based on the impulse reflectometry. With pulse, reflectometry analyzes the input circuit fiber optic microwave channel. The transmission coefficient is determinate.

Keywords: UHF, optical fiber, S-parameters, pulse reflectometry, transmission coefficient.

Automating the process of measuring the temperature, current and voltage during spark-plasma sintering of disperse compositions / O.N. Syzonenko, V.V. Litvinov, S.V. Konotop, A.A. Kovalenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 130-140. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

In present work a program of automation of measuring of disperse compositions spark plasma sintering parameters (temperature, current and voltage) was developed with LabVIEW graphical programming environment; its testing and approbation in conditions of real experiment were performed. It is found, that program allows to monitor the progress of the sintering process in real time to control it and, if necessary, to correct; also it decreases complexity of the measurement process.

Key words: sparkplasma sintering, programming environment, algorithm, program, temperature, current, voltage.

Stabilization and regulation of the regime parameters of high-voltage electric discharge system for electropulse synthesis of nanocarbon / A. A. Scherba, D. V. Vinnychenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 141-151. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-0740.

Theoretical bases of stabilize and regulate regime parameters of high-voltage electric discharge system for the new technology of electropulse synthesis of nanocarbon were developed. Construction principles of electrodischarge system stabilization pulse current repeatedly change the output voltage of a discharge system were implemented.

Key words: Electrotechnical system, spark discharge, pulse current, stabilization, resonance, voltage inverter, the synthesis of nanocarbon.

Investigation of the perceptron's work as a growing neural network for solving the problem of symbols recognition / A.G. Yushchenko, A.V. Subotina, T.V. Zakhozhaeva // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 152-158. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

The investigation of perceptron for solving a problem of character recognizing is carried out. The structure of the neural network is selected and justified, the possibility of improving the properties of generalization by increasing its structure is shown, the perceptron's work in recognizing not only two, but also four letters, and letters with different shapes is analyzed.

Key words: perceptron, recognition, symbol, growing neural network.

Evolutionary design of seven-tier LM-mode filters optimized with original knowledge-based CAD system / A.G.Yushchenko, D.B.Mamedov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 159-170. – Bibliogr.: 31. – ISSN 2079-0740.

The evolutionary strategy of multi-tier WDR - filters with LM-modes, optimized with original knowledge-based CAD system designing is proposed and tested. Main point of the strategy is to solve the problem of synthesis and optimization of the seven - (or more) tiered filter through the gradual complication of the simplest - one-tiered design, which corresponds to the evolutionary principle of gradual cost function complication. The efficiency of the strategy is confirmed by the designing of three to five and seven-tier millimeter filters, which are intended for the next generation of millimeter wave-band wireless systems and conform to the latest standards like ECMA- 387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c and IEEE 802.11ad.

Keywords: Evolutionary strategies, Knowledge-based CAD system, LM-mode filters, WirelessHD, IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11ad.

ЗМІСТ

Баранов М. И. Трансформация электронных полувольт в электрической цепи с разнородными металлическими проводниками и импульсным током большой плотности	3
Богуславский Л. З., Мирошниченко Л. Н. Электрофилтрация разноименных газовых выбросов в комплексной системе пылегазоочистки экологически опасных промышленных объектов	12
Діордійчук В. В., Козирев С. С., Овчиннікова Л. Є. Алгоритмічне та апаратно-програмне забезпечення моделювання адаптивних систем керування розрядно-імпульсними технологіями	17
Жекул В.Г., Мельхер Ю.И., Поклонов С. Г., Смирнов А. П., Швеиц И. С. Исследования стабильности работы высоковольтных газонаполненных неуправляемых разрядников электроразрядных погружных установок	23
Золотарев В.М., Антонец Ю.А., Золотарев В.В., Белянин Р.В., Науменко А.А. Выбор основных требований к электрическим испытаниям отечественных образцов кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена	31
Золотарев В.М., Антонец С.Ю., Золотарев В.В., Бузько С.В., Науменко А.А. Измерение уровня частичных разрядов новых типов силовых кабелей	36
Золотарев В. М., Антонец Т. Ю., Карпушенко В. П., Науменко А. А. Отечественные типы пожаробезопасных кабелей разработки ПАО «Завод «Южкабель» и требования, предъявляемые к ним	42
Золотарев В. М., Золотарев В. В., Бузько С. В., Антонец Т. Ю., Науменко А. А. Влияние проводимости экранов на диэлектрические потери в кабелях	50
Иванов В. М. Трансформатор с индуктивным накоплением энергии	55
Касілов О. В., Суботіна А. В. Система підготовки бібліографічних описів згідно міжнародним стандартам	60
Колиушко Г. М., Недзельский О. С., Понуждаева Е. Г., Борисов Р. К., Хренов С. И., Ковалев Д. И. Устройство блокировки оперативных переключений (УБОП) комплекса электрооборудования нового поколения	66
Коробко А. И., Коробко З. И. Инженерная методика определения импульсных напряжений и токов, наводимых на межэлементных соединениях печатной платы при воздействии импульсного электромагнитного поля	71

Кравченко В. И., Коробко А. И., Яковенко И. В. Влияние внешних электромагнитных факторов на волноводные характеристики полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий	79
Кравченко В. И., Яковенко И. В. Механизмы отказов полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий при воздействии внешнего электромагнитного излучения	84
Лабзун М. П., Лежнюк П. Д., Рубаненко А. Е., Рудаков В. В. Параметрические отказы конденсаторов СМА -166/ 3-14 в юго-западной электроэнергосистеме Украины	88
Немченко Ю. С. Измерение эмиссии токов радиопомех от бортового авиационного оборудования	96
Немченко Ю. С., Князев В. В., Лесной И. П., Сомхивев С. Б. Генератор для испытаний БАО на восприимчивость к переходным процессам, вызванных молнией («многократные удары») ИГЛА-МКУ-2	108
Петков А. А. Вероятность появления поражающего разряда молнии в районе расположения стержневого объекта	115
Постельник И. А. Измерение S-параметров оптического СВЧ тракта на принципе импульсной рефлектометрии	122
Сизоненко О.Н., Литвинов В.В., Конотов С.В., Коваленко А.А. Автоматизация процесса измерения температуры, тока и напряжения при искроплазменном спекании дисперсных композиций	130
Щерба А.А., Вінниченко Д.В. Стабілізація та регулювання режимних параметрів високовольтної електророзрядної системи для електроімпульсного синтезу нановуглецю	141
Ющенко А.Г., Субботина А.В., Захожаева Т.В. Исследование перцептрона как растущей нейросети для решения задачи распознавания символов	152
Yushchenko A. G., Mamedov D. B. Evolutionary design of seven-tier LM-mode filters optimized with original knowledge-based CAD system	159
Рефераты	171
Рефераты	176
Abstracts	182

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

Збірник наукових праць

Серія:

Техніка та електрофізика високих напруг

№ 21 (1064)

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 № 61-14.

Підп. до друку 06.06.2014 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.
