

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

ВІСНИК

**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Серія: Техніка та електрофізика високих напруг

№ 15 (1237) 2017

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2017

Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».
Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ».
– 2017. – № 15 (1237). – 119 с.

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

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

Координаційна рада:

Голова: Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України;

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. Клепіков, 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.; 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, проф.;

А. Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.; Б. В. Клименко, д-р техн. наук, проф.;

В. В. Князев, канд.техн.наук, ст.наук.співр.; Г. М. Коліушко, канд.техн.наук, ст.наук.співр.;

В. М. Михайлов, д-р техн. наук, проф.; О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.;

І. В. Яковенко, д-р фіз.-мат. наук, проф.

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 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 № 3 від 24 березня 2017 р.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCES OF UKRAINE
National technical university
"Kharkiv polytechnic institute"

BULLETIN
OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
"KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE"

Series: Technique and Electrophysics of High Voltage

№ 15 (1237) 2017

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkiv
NTU "KhPI", 2017

Bulletin of the National technical university " Kharkiv polytechnic institute". Collected Works. Series: Techniques and Electrophysics of High Voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2017. – № 15 (1237) – 119 p.

State edition

Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy

KB № 5256 from July, 2, 2001

The collection is published on Ukrainian, Russian and English.

The Bulletin of the National Technical University " Kharkiv polytechnic institute" is put on "The List of Scientific Professional Editions of Ukraine that publish the data of theses for the degree of candidate of sciences and the degree of doctor" approved by the Decision of the Certifying Board of the Ministry of Education and Science of Ukraine as to the Activities of Special Academic Councils of December 2015. Order No 1328 (Supplement No 8) of 21.12.2015.

Coordinating Board:

L. L. Tovazhnyansky, Dr. Tech. Sci., Prof. (chief), member NAS of Ukraine;

K.A. Gorbunov, PhD. Tech.Sci., Assistant Prof. (secretary);

A. P.Marchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; Ye. I. Sokol, Dr. Tech. Sci., Prof., member NAS of Ukraine;

Ye.Ye. Aleksandrov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A.V. Boyko, Dr. Tech. Sci., Prof.;

F.F. Gladkiy, Dr. Tech. Sci., Prof.; M.D. Godlevskiy, Dr. Tech. Sci., Prof.;

A.I. Grabchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.G. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.;

V.D. Dmitrienko, Dr. Tech. Sci.; Prof.; I.F. Domnin, Dr. Tech. Sci., Prof.;

V.V. Yepifanov, PhD. Tech. Sci., Prof.; Yu.I. Zaytsev, PhD. Tech. Sci., Prof.;

P.O. Kachanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.V. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.;

V.I. Kravchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; G.V. Lisachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.;

O.K. Morachkovskiy, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.I. Nikolaenko, PhD. Hist. Sci., Prof.;

P.G. Pererva, Dr. Econ. Sci., Prof.; V.A. Pulyaev, Dr. Tech. Sci., Prof.;

M.I. Rishchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.B. Samorodov, Dr. Tech. Sci., Prof.;

G.M. Suchkov, Dr. Tech. Sci., Prof.; M.A. Tkachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.

Editorial Board:

V.I. Kravchenko, Dr. Tech. Sci., Prof. (editor);

L.V. Vavriv, PhD. Phys.-Math. Sci., Senior Researcher (secretary);

M.I. Baranov, Dr. Tech. Sci., Senior Researcher; N.I. Boyko, Dr. Tech. Sci., Prof.;

A.G. Gurin, Dr. Tech. Sci., Prof., B.V. Klimenko, Dr. Tech. Sci., Prof.,

V.V. Knyaziev, PhD. Tech. Sci., Senior Researcher; V.M. Mishajlov, Dr. Tech. Sci., Prof.,

G.M. Koliushko, PhD. Tech. Sci., Senior Researcher; O.A. Serkov, Dr. Tech. Sci., Prof.;

L.V. Yakovenko, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof.

In April 2013 Bulletin of the National Technical University "Kharkiv polytechnic institute" series "Techniques and Electrophysics of High Voltage" included in the directory database of periodicals "Uirich's Periodicals Directory" (New Jersey, USA).

Recommended for publication by the Academic Council of NTU "KhPI"

Protocol number 3, March, 24, 2017

УДК 621.3.015.52 : 621.3.022

М.И. БАРАНОВ**ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА ИСКРОВОГО РАЗРЯДА В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ СИЛЬНОТОЧНОМ ВОЗДУШНОМ КОММУТАТОРЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ**

Розглянуто три основні методи розрахунку активного опору R_c каналу іскрового розряду з низькотемпературною плазмою в сильноточному повітряному коммутаторі (СПК) атмосферного тиску, широко використовуваному в розрядних колах високовольтних електрофізичних установок (ВЕФУ) з потужними ємнісними накопичувачами енергії (ЕНЕ). Описані і проаналізовані на конкретних прикладах практичного застосування СПК у складі ВЕФУ з ЕНЕ експериментальний, енергетичний і плазмодинамічний методи визначення в робочому повітряному проміжку досліджуваного коммутатора активного опору R_c плазмового каналу іскри. Виконано порівняння отриманих чисельних результатів для активного опору R_c іскри в СПК з відомими подібними вітчизняними і зарубіжними даними в галузі високовольтної імпульсної техніки.

Ключові слова: високовольтний сильнострумний повітряний коммутатор; плазмовий канал повітряного іскрового розряду; активний опір каналу іскри; експериментальний, енергетичний і плазмодинамічний методи розрахунку активного опору іскри.

Рассмотрены три основных метода расчета активного сопротивления R_c канала искрового разряда с низкотемпературной плазмой в сильноточном воздушном коммутаторе (СВК) атмосферного давления, широко используемом в разрядных цепях высоковольтных электрофизических установок (ВЭФУ) с мощными емкостными накопителями энергии (ЕНЭ). Описаны и проанализированы на конкретных примерах практического применения СВК в составе ВЭФУ с ЕНЭ экспериментальный, энергетический и плазмодинамический методы определения в рабочем воздушном промежутке исследуемого коммутатора активного сопротивления R_c плазменного канала искры. Выполнено сравнение полученных численных результатов для активного сопротивления R_c искры в СВК с известными подобными отечественными и зарубежными данными в области высоковольтной импульсной техники.

Ключевые слова: высоковольтный сильнотоочный воздушный коммутатор; плазменный канал воздушного искрового разряда; активное сопротивление канала искры; экспериментальный, энергетический и плазмодинамический методы расчета активного сопротивления искры.

Three basic methods of calculation of active resistance of R_c of channel of a spark digit are considered with low temperature plasma in a heavy-current air switchboard (HCAS) atmospheric pressure, widely in-use in the bit chains of high-voltage electrophysics options (HVEO) with the powerful capacity stores of energy (CSE). Described and analysed on the concrete examples of practical application of HCAS in composition HVEO with CSE experimental, power and plasma-dynamic methods of determination in a worker air interval of the probed switchboard of active resistance R_c plasma channel of spark. Comparison of the got numeral results is executed for active resistance of R_c of spark in HCAS with the known similar domestic and foreign information in area of high-voltage impulsive technique.

Key words: high-voltage heavy-current air switchboard; plasma channel of an air spark discharge; active resistance of channel of spark; experimental, power and plasma-dynamic methods of calculation of active resistance of spark.

Введение. Известно, что в состав любой высоковольтной электрофизической установки (ВЭФУ) с мощным емкостным (ЕНЭ) или индуктивным (ИНЭ) накопителем энергии входит электротехническое устройство, предназначенное для коммутации ее сильноточной разрядной цепи. Согласно отечественной электрофизической терминологии подобное устройство обычно называется разрядником, а зарубежной – коммутатором. В своем дальнейшем изложении остановимся на последнем техническом термине, получившем наиболее широкое распространение в научно-технической среде. На практике в ВЭФУ с ЕНЭ или ИНЭ могут использоваться различные конструкции высоковольтных коммутаторов, включающие вакуумные, газоразрядные, жидкостные и твердотельные рабочие межэлектродные диэлектрические среды [1–5]. В области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) широкое применение получили сравнительно дешевые и простые в изготовлении сильноточные воздушные коммутаторы (СВК) атмосферного давления на постоянное напряжение до ± 125 кВ и коммути-

руемые импульсные токи амплитудой до ± 1000 кА, содержащие электроды различных геометрических форм, изготовленные из средне- и тугоплавких металлов или металлокомпозиций (в частности, композиции «вольфрам-медь») [1,4,6-8]. При некоторых определенных преимуществах СВК имеют и ряд недостатков, включающих: во-первых, повышенный электроэрозионный износ рабочих поверхностей их основных электродов; во-вторых, повышенный шум при их срабатывании из-за сильноточного искрового разряда, возникающего и свободно развивающегося в воздухе между основными электродами коммутатора; в-третьих, сравнительно низкие значения удельной электропроводности γ_c плазмы в их разрядном канале, влияющие на значение активного сопротивления R_c искры. В этой связи для СВК актуальными остаются задачи, связанные с расчетной оценкой в них тепловых потерь в плазменном канале искрового разряда и на основных электродах коммутатора, а также электрической эрозии рабочих поверхностей их основных металлических электродов.

Целью статьи является рассмотрение основных методов расчета активного сопротивления R_c плазменного канала искры, возникающей между электродами СВК, используемого в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ. Знание величины R_c существенно упрощает расчетную оценку тепловой энергии W_c , выделяющейся за время полного разряда ЕНЭ ВЭФУ в канале указанной искры.

1 Постановка задачи исследования. В рамках данного исследования рассмотрим канал воздушного искрового разряда длиной l_c , развивающегося во времени t между двумя массивными металлическими электродами СВК, включенного в разрядную цепь ВЭФУ с мощным ЕНЭ и сосредоточенной активно-индуктивной нагрузкой (рис. 1). Примем, что исследуемый канал искры имеет цилиндрическую конфигурацию и неизменную во времени t длину l_c , равную минимальной длине воздушного промежутка между основными электродами коммутатора. Считаем, что радиус r_c рассматриваемого плазменного канала изменяется во времени t по закономерностям, характерным для сильноточного воздушного искрового разряда [1, 9]. Принимаем, что наружный радиус R_e катода и анода СВК значительно превышает глубины проникновения в их материалы электромагнитного и теплового полей, создаваемых цилиндрическим каналом искрового разряда радиусом $r_c < R_e$ в зонах его привязки на рабочих поверхностях электродов коммутатора. В этой связи полагаем, что рабочие поверхности рассматриваемых электродов СВК в указанных зонах искры в первом приближении будут близки к плоским. Пусть основные электроды СВК работают при нормальных атмосферных условиях (давление воздуха составляет $1,013 \cdot 10^5$ Па, а его температура равна 0°C [10]). Считаем, что плотность теплового потока и плотность разрядного тока $i_d(t)$ ВЭФУ в канале воздушного искрового разряда для исследуемого коммутатора практически равномерно распределены по его поперечному круглому сечению с переменным во времени t радиусом r_c . Одним из подтверждений тому является то, что в сильноточном канале газового разряда термодинамическая электронная и ионная температуры характеризуются практически однородным распределением по его текущему радиусу r_c [11]. Требуется получить новые соотношения для приближенного расчета активного сопротивления R_c плазменного канала искры в СВК, применяемом в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ.

2 Основные методы расчета активного сопротивления канала искры в СВК разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ. Начнем вначале с двух приближенных расчетных методов опосредованного (косвенного) определения величины активного сопротивления R_c плазменного канала искры в исследуемом СВК, электрически включенном в разрядную цепь ВЭФУ с ЕНЭ. Данные методы включают: во-первых, *экспериментальный метод*, базирующийся на опытных данных для основных амплитудно-временных параметров (АВП) импульсного разрядного тока $i_d(t)$ в цепи ВЭ-

ФУ с ЕНЭ; во-вторых, *энергетический метод*, основанный на определении интеграла действия J_a импульсного разрядного тока $i_d(t)$ в цепи ВЭФУ с ЕНЭ. Затем рассмотрим третий приближенный расчетный метод непосредственного (прямого) определения величины активного сопротивления R_c плазменного канала искры в указанном СВК, получивший название *плазмодинамического метода*.

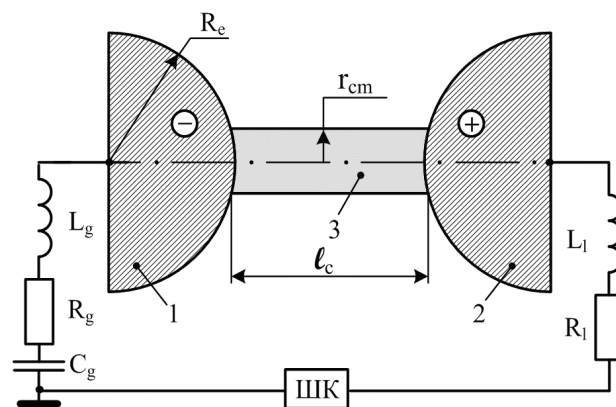


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ и высоковольтным сильноточным двухэлектродным воздушным коммутатором (1,2 – полусферические катод и анод коммутатора наружным радиусом R_e ; 3 – плазменный канал искрового разряда длиной l_c и максимальным радиусом r_c ; R_g, L_g, C_g – собственные электрические параметры ВЭФУ с ЕНЭ; R_l, L_l – собственные электрические параметры нагрузки; ШК – измерительный коаксиальный шунт типа ШК-300, рассчитанный на измерение импульсного микросекундного тока амплитудой I_m до ± 300 кА при его интеграле действия J_a до $2,5 \cdot 10^6$ Дж/Ом [12,13])

2.1 Экспериментальный метод расчета активного сопротивления канала искры в СВК разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ. Для практической реализации данного метода по нахождению величины активного сопротивления R_c искры в СВК пользователю необходимо иметь осциллограмму разрядного тока $i_d(t)$ в сильноточной цепи ВЭФУ с ЕНЭ. В дальнейшем воспользуемся осциллограммой, характерной для затухающего синусоидального тока в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ и исследуемым СВК и приведенной нами на рис. 2.

Отметим, что представленная на рис. 2 осциллограмма большого импульсного тока (БИТ) была получена в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ и СВК [12], используемой в отделе №4 электромагнитных исследований и испытаний НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» при формировании на низкоомной RL -нагрузке согласно требованиям нормативных документов США SAE ARP 5412 и SAE ARP 5416 [14,15] БИТ, соответствующего АВП импульсной A -компоненты тока искусственной молнии [8, 12]. При ее получении использовался мощный ЕНЭ одномодульного исполнения, построенный на основе 111 шт. параллельно соединенных высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИК-50-3 и характеризующийся при номинальном напряжении ± 50 кВ номинальной емкостью его конденсаторной батареи, состав-

ляющей около $W_g = 416$ кДж [12]. В рабочем режиме используемой ВЭФУ с ЕНЭ и СВК, соответствующем данным рис. 2, зарядное напряжение U_{c0} отрицательной полярности указанных конденсаторов его ЕНЭ составляло около 29,7 кВ, а запасаемая электрическая энергия W_{g0} в ЕНЭ была равной примерно 147 кДж. Собственные электрические параметры ЕНЭ (до сборных стальных шин его коллектора без учета влияния СВК) составляли [12, 16]: емкость $C_g = 333$ мкФ; индуктивность $L_g = 2,05$ мкГн; активное сопротивление $R_g = 57$ мОм. Собственные электрические параметры сосредоточенной нагрузки были выбраны равными [15]: $R_l = 10$ мОм; $L_l = 0,3$ мкГн. Укажем, что при измерении АВП импульсного тока $i_d(t)$ полной длительностью $t_0 = 500$ мкс в разрядной цепи рассматриваемой ВЭФУ с мощным ЕНЭ и высоковольтным СВК, электродная система которого с массивными ($R_e = 61,5$ мм) основными стальными полусферическими электродами в укрупненном виде приведена на рис. 3, использовались поверенные государственной метрологической службой измерительный коаксиальный шунт ШК-300 [12] (собственное активное сопротивление $R_s \approx 0,2$ мОм; коэффициент преобразования $K_s \approx 10,42 \cdot 10^3$ А/В [13]) и цифровой записывающий осциллограф типа Tektronix TDS 1012.

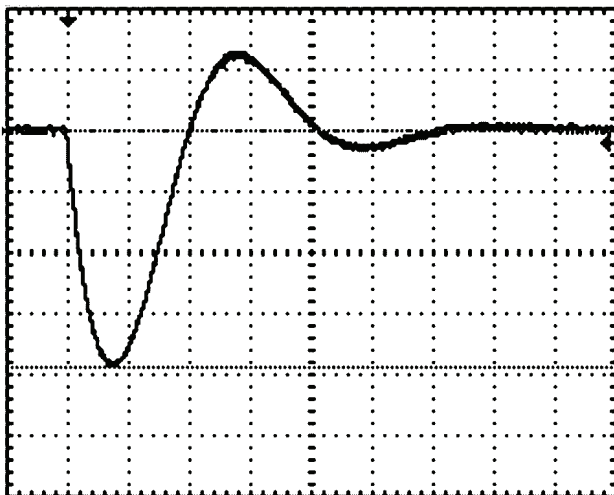


Рисунок 2 – Осциллограмма импульсного затухающего синусоидального тока в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ и сосредоточенной активно-индуктивной нагрузкой ($R_l = 10$ мОм; $L_l = 0,3$ мкГн), коммутируемого высоковольтным СВК каскадного типа с двумя массивными основными полусферическими электродами и одним управляющим сферическим электродом из стали марки Ст.3 на номинальное напряжение ± 50 кВ и импульсный микросекундный ток амплитудой I_m до ± 300 кА ($U_{c0} = -29,7$ кВ; $W_{g0} = 147$ кДж; $I_{ms} = -202$ кА; $\delta_i = 13,00 \cdot 10^3$ с $^{-1}$; $\omega_i = 30,79 \cdot 10^3$ с $^{-1}$; $k_{ds} = 1,783$; $t_{ms} = 36$ мкс; $t_0 = 500$ мкс; $J_a = 2,12 \cdot 10^6$ Дж/Ом; $q_c = 9,93$ Кл; масштаб по вертикали – 52,1 кА/деление; масштаб по горизонтали – 50 мкс/деление)

Из опытных данных рис. 2 следует, что период колебаний T_i затухающего синусоидального тока в разрядной цепи ЕНЭ составляет примерно 204 мкс, а его логарифмический декремент колебаний $\Delta_i = \ln(A_1/A_3)$, где A_1, A_3 – модули амплитуды соответственно первой и третьей полуволн тока, оказывается

равным 2,652. Тогда из известного математического соотношения для коэффициента затухания δ_i разрядного тока находим, что $\delta_i = \Delta_i/T_i = 13,00 \cdot 10^3$ с $^{-1}$. Кроме того, для круговой частоты колебаний ω_i рассматриваемого тока получаем, что $\omega_i = 2\pi/T_i = 30,79 \cdot 10^3$ с $^{-1}$. При расчетном определении по экспериментальным данным рис. 2 суммарной индуктивности L_Σ разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ и СВК используем известное в теоретической электротехнике соотношение, имеющее следующий аналитический вид:

$$L_\Sigma = (\omega_i^2 + \delta_i^2)^{-1} \cdot C_g^{-1}. \quad (1)$$



Рисунок 3 – Укрупненный вид электродной системы высоковольтного сильноточного воздушного коммутатора каскадного типа с двумя массивными основными полусферическими электродами и управляющим сферическим электродом $\varnothing 30$ мм из стали марки Ст.3 на номинальное напряжение ± 50 кВ и импульсный микросекундный ток амплитудой I_m до ± 300 кА (после однократного воздействия на ее стальные электроды в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ импульсного затухающего синусоидального тока частотой 4,9 кГц и амплитудой $I_{ms} = -202$ кА; $J_a = 2,12 \cdot 10^6$ Дж/Ом; опытное значение радиуса канала искры между катодом и анодом СВК $l_c = 13,5$ мм; $R_e = 61,5$ мм)

При полученных путем расшифровки токовой осциллограммы разрядного тока $i_d(t)$ на рис. 2 численных значениях для $\omega_i = 30,79 \cdot 10^3$ с $^{-1}$ и $\delta_i = 13,00 \cdot 10^3$ с $^{-1}$ из (1) с учетом заданной электрической емкости мощной конденсаторной батареи ВЭФУ ($C_g = 333$ мкФ) находим, что $L_\Sigma = 2,68$ мкГн. В результате для суммарного активного сопротивления R_Σ разрядной цепи ЕНЭ с учетом искры исследуемого СВК получаем, что $R_\Sigma = 2\delta_i L_\Sigma \approx 69,7$ мОм. В рассматриваемом нами электрофизическом случае для суммарного активного сопротивления R_Σ исследуемой сильноточной разрядной цепи экспериментальной ВЭФУ будет справедливо следующее соотношение:

$$R_\Sigma \approx R_g + R_l + R_s + R_c. \quad (2)$$

Подставив в (2) известные исходные количественные данные для R_g, R_l и R_s , с учетом найденного указанным выше путем по опытной осциллограмме разрядного тока $i_d(t)$ в установке значения суммарного активного сопротивления R_Σ разрядного контура используемой ВЭФУ с мощным ЕНЭ для активного со-

противления R_c канала сильноточной воздушной искры в СВК находим, что в рассматриваемом приближении $R_c \approx 2,5$ мОм. Тогда при $l_c = 13,5$ мм для погонного активного сопротивления $R_{c0} = R_c/l_c$ искры в СВК получаем численное значение, равное около 0,185 мОм/мм. Это расчетное значение R_{c0} в пределах 10 % отличается от соответствующего опытного погонного значения активного сопротивления канала сильноточной воздушной искры, указанного в [16] и характерного для БИТ микросекундного диапазона.

2.2 Энергетический метод расчета активного сопротивления канала искры в СВК разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ. Из уравнения энергетического баланса в исследуемой разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ и СВК для ее суммарного активного сопротивления R_Σ имеем:

$$R_\Sigma = W_{g0} J_a^{-1}, \quad (3)$$

где $J_a = \int_0^\infty i_d^2(t) dt$ интеграл действия импульсного тока

в разрядной цепи конденсаторной батареи ВЭФУ, содержащей рассматриваемый СВК с каналом искры.

Из (3) видно, что при заданном значении электрической энергии W_{g0} , запасенной в конденсаторной батарее ВЭФУ, вычисление величины R_Σ будет сводиться к нахождению интеграла действия тока J_a в цепи ВЭФУ.

В случае изменения разрядного тока $i_d(t)$ по закону экспоненциально затухающей синусоиды, имеющему аналитический вид $i_d(t) = k_{ds} I_{ms} \exp(-\delta_i t) \sin(\omega_i t)$, при определении интеграла действия тока J_a в рассматриваемой сильноточной цепи высоковольтной установки можно воспользоваться следующим расчетным соотношением:

$$J_a = 0,25 k_{ds}^2 I_{ms}^2 \delta_i^{-1} [(\delta_i / \omega_i)^2 + 1]^{-1}, \quad (4)$$

где I_{ms} – первая амплитуда разрядного тока $i_d(t)$, изменяющегося с круговой частотой ω_i и коэффициентом затухания δ_i в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ;

$k_{ds} = [\exp(-\delta_i \omega_i^{-1} \text{arcctg } \delta_i \omega_i^{-1}) \sin(\text{arcctg } \delta_i \omega_i^{-1})]^{-1}$ – нормирующий коэффициент для импульсного тока [16].

Тогда для данных осциллограммы тока, показанной на рис. 2, из (4) при $I_{ms} = -202$ кА, $\delta_i = 13,00 \cdot 10^3$ с⁻¹, $\omega_i = 30,79 \cdot 10^3$ с⁻¹ и $k_{ds} = 1,783$ находим, что интеграл действия разрядного тока J_a в цепи ВЭФУ с ЕНЭ и СВК численно составляет примерно $2,12 \cdot 10^6$ Дж/Ом. Используя (3), при $W_{g0} = 147$ кДж и указанном расчетном значении $J_a = 2,12 \cdot 10^6$ Дж/Ом определяем, что суммарное активное сопротивление R_Σ в сильноточной разрядной цепи рассматриваемой ВЭФУ, коммутируемой СВК, будет численно составлять около 69,3 мОм. Это найденное с помощью энергетического подхода численное значение суммарного активного сопротивления R_Σ всего в пределах 1 % отличается от аналогичного сопротивления в разрядной цепи ВЭФУ ($R_\Sigma \approx 69,7$ мОм), определенного по результатам расшифровки опытной осциллограммы тока

разряда ЕНЭ, приведенной на рис. 2. В результате из (2) при принятых исходных количественных данных для $R_g = 57$ мОм, $R_l = 10$ мОм и $R_s = 0,2$ мОм следует, что при использовании энергетического метода расчета активное сопротивление R_c канала искры в СВК с электродной системой, показанной на рис. 3, искомое активное сопротивление искры оказывается численно равным примерно 2,1 мОм. От ранее полученного на основе экспериментального метода расчета величины активного сопротивления R_c для канала сильноточной искры исследуемого СВК ($R_c \approx 2,5$ мОм) данное численное значение для R_c отличается не более чем на 16 %. Следует обратить внимание специалистов из области ВИТ на то, что при использовании на практике энергетического метода расчета величины активного сопротивления R_c искры в СВК должны предъявляться повышенные требования к точности нахождения электрической емкости C_g конденсаторной батареи ВЭФУ и ее зарядного высокого напряжения U_{c0} и соответственно значения запасаемой в ЕНЭ электрической энергии W_{g0} .

2.3 Плазодинамический метод расчета активного сопротивления канала искры в СВК разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ. При использовании данного метода для приближенного расчета величины сопротивления искры в исследуемом СВК воспользуемся новым электрофизическим понятием эквивалентного активного сопротивления R_{ce} плазменного канала воздушного искрового разряда. Под этим понятием будем понимать такое усредненное во времени t постоянное активное сопротивление, на котором при прохождении в цепи ВЭФУ с ЕНЭ импульсного разрядного тока $i_d(t)$ рассеивается такая же тепловая энергия, как и на реальном переменном во времени t сопротивлении рассматриваемого канала искрового разряда в электродной системе СВК. В этой связи при предлагаемом подходе величина активного сопротивления R_{ce} искры в исследуемом СВК будет оставаться неизменной в течение всего времени t протекания через рассматриваемый высоковольтный коммутатор импульсного разрядного тока $i_d(t)$ ВЭФУ с ЕНЭ. При этом для приближенного определения в общем виде переменного во времени t активного сопротивления $R_c(t)$ плазменного канала искрового разряда в электродной системе СВК воспользуемся следующим классическим электротехническим соотношением [16]:

$$R_c(t) = l_c / [\pi r_c^2(t) \gamma_c], \quad (5)$$

где $r_c(t)$, l_c – соответственно изменяющийся во времени t радиус и неизменная длина плазменного канала искрового разряда между металлическими электродами СВК; γ_c – усредненная удельная электропроводность низкотемпературной плазмы в канале искры коммутатора.

Как известно, радиус $r_c(t)$ одиночного плазменного канала искрового разряда в СВК любой конструкции изменяется в процессе протекания импульсного тока $i_d(t)$ в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ практически в интервале от нуля до своего максимального значения r_{cm} [1, 6-11]. Причем, вначале на нарастающей

части разрядного тока $i_d(t)$ данное изменение происходит от нуля до r_{cm} , а затем на спадающей части этого импульсного тока – от r_{cm} до нуля. Вот поэтому согласно (5) кривая изменения величины активного сопротивления $R_c(t)$ плазменного искрового канала в СВК во времени t может быть аппроксимирована симметричной U -образной кривой, характеризующейся своими двумя максимальными значениями в моменты времени t , соответствующие нулевым значениям тока $i_d(t)$ и равенству $r_c = 0$, и своим одним минимальным значением в момент времени t , когда ток $i_d(t)$ достигает своего амплитудного значения и $r_c = r_{cm}$. С учетом соответствующего изменения в (5) во времени t радиальной функции вида $f(r_c) = r_c^2$ на отрезке изменения радиуса канала искры $[0; r_{cm}]$ и нахождения на указанном отрезке ее среднего значения для эквивалентного и постоянного во времени t активного сопротивления R_{ce} одиночного плазменного канала искрового разряда в СВК рассматриваемой ВЭФУ с ЕНЭ получаем следующее приближенное выражение:

$$R_{ce} = l_c / (\pi \gamma_c r_{cm}^{-1} \int_0^{r_{cm}} r_c^2 dr_c) = 3l_c / (\pi r_{cm}^2 \gamma_c). \quad (6)$$

Отметим, что из (6) вытекает расчетное выражение для эквивалентного радиуса плазменного канала искры в исследуемом СВК, равного $r_{ce} \approx 0,577 \cdot r_{cm}$. Необходимую для (6) величину максимального радиуса r_{cm} (м) канала искрового разряда в воздушном коммутаторе атмосферного давления находим в системе СИ по известной формуле Брагинского для канала искры [1, 9]:

$$r_{cm} = 0,093 (I_{ms})^{1/3} (t_{ms})^{1/2}, \quad (7)$$

где t_{ms} – время (с), соответствующее первой амплитуде I_{ms} (А) импульсного колебательного или амплитуде униполярного аperiодического тока $i_d(t)$ в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ.

Расчетная оценка величины радиуса r_{cm} по (7) для воздушной искры с абсолютными значениями АВП импульсного разрядного тока $i_d(t)$ ВЭФУ с мощным ЕНЭ согласно данным рис. 2 ($I_{ms} = 202$ кА; $t_{ms} = 36$ мкс) показывает, что применительно к рассматриваемому электрофизическому случаю $r_{cm} \approx 32,7$ мм. Из экспериментальных данных, представленных на рис. 3, следует, что опытный максимальный радиус r_{cm} круглой лунки (кратера) разрушения на рабочих поверхностях основных стальных электродов в исследуемом СВК примененной в опытах ВЭФУ с мощным ЕНЭ составляет около 31 мм. Видно, что расчетные и опытные результаты для радиуса r_{cm} плазменного канала искры и соответственно радиуса его зоны привязки на рабочих поверхностях стального анода и катода указанного СВК отличаются в пределах 5 %. Полученные указанные экспериментальные данные подтверждают работоспособность используемой из [1,9] расчетной формулы Брагинского для плазменного канала воздушной искры при ее применении в области БИТ микросекундного диапазона, характерных для импульсной A -компоненты тока молнии [8].

Тогда, исходя из (6) и (7), обобщенное выражение для эквивалентного активного сопротивления R_{ce}

(Ом) одиночного плазменного канала воздушного искрового разряда в СВК рассматриваемой цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ принимает в СИ следующий окончательный вид:

$$R_{ce} = 110,41 \cdot l_c / (\gamma_c I_{ms}^{2/3} t_{ms}). \quad (8)$$

Из (8) видно, что при известных значениях I_{ms} , t_{ms} и l_c для приближенного расчета величины эквивалентного активного сопротивления R_{ce} искры в исследуемом СВК необходимо иметь численное значение удельной электропроводности γ_c плазмы в канале воздушного искрового разряда. Результаты выполненных автором в условиях высоковольтной лаборатории экспериментальных исследований на ВЭФУ с мощным ЕНЭ свидетельствуют о том, что для высоковольтных воздушных коммутаторов атмосферного давления на рабочее постоянное напряжение до ± 35 кВ и импульсные токи микросекундной длительности в разрядной цепи конденсаторной батареи ВЭФУ с низкоомной RL -нагрузкой при их амплитуде до ± 250 кА входящая в (8) и найденная косвенным путем (на основе предварительного опытного определения из осциллограмм разрядного тока $i_d(t)$ ВЭФУ численного значения активного сопротивления свободно «горящей» воздушной искры в СВК) с учетом (6) величина усредненной удельной электропроводности γ_c плазмы в канале воздушного искрового разряда между массивными медными и стальными электродами СВК атмосферного давления принимает значения, численно составляющие от 4000 до 5000 (Ом·м)⁻¹ [16]. Данные опытные значения γ_c заметно отличаются от соответствующих предполагаемых значений удельной электропроводности низкотемпературной плазмы воздушной искры (порядка $20 \cdot 10^3$ (Ом·м)⁻¹), приведенных в [1] и характерных для высокоионизированной плазмы. Согласно [17] при термодинамической электронной температуре в сильноточном канале искрового разряда порядка 10^4 К, характерной для канала воздушной сильноточной искры в исследуемом СВК атмосферного давления [18], даже в плотной плазме канала подводного искрового разряда, инициируемого электрическим взрывом тонкой металлической проволоочки, численные значения для ее удельной электропроводности γ_c в зависимости от уровня канального давления составляют всего от нескольких сотен до нескольких тысяч (Ом·м)⁻¹.

Из (8) для АВП импульсного разрядного тока $i_d(t)$ в ВЭФУ с мощным ЕНЭ согласно приведенной на рис. 2 его осциллограмме ($I_{ms} = 202$ кА; $t_{ms} = 36$ мкс) при $l_c = 13,5$ мм и $\gamma_c = 5 \cdot 10^3$ (Ом·м)⁻¹ следует, что эквивалентное активное сопротивление R_{ce} плазменного канала воздушного искрового разряда в исследуемом СВК принимает численное значение, составляющее около 2,4 мОм. Из сравнения данного значения R_{ce} , полученного с помощью предлагаемого плазмодинамического метода расчета активного сопротивления искры в СВК, с расчетными оценочными результатами для R_c по двум выше рассмотренным другим методам его определения (экспериментальному и энергетическому методам) следует, что они между собой отличаются в пределах 13 %. Из представленных расчетно-экспериментальных результатов электрофизи-

ческого исследования видно, что при практическом применении плазмодинамического метода расчета активного сопротивления плазменного канала воздушной искры в СВК специалист должен пользоваться проверенными и достоверными количественными данными для удельной электропроводности γ_c низкотемпературной плазмы в канале воздушного разряда.

Выводы

1 Выполнена апробация на реальных электрофизических примерах практического использования ВЭФУ с мощным ЕНЭ и СВК трех методов приближенного расчета активного сопротивления R_c плазменного канала воздушного искрового разряда в СВК, включающих *экспериментальный, энергетический и плазмодинамический методы* определения величины R_c .

2 Установлено, что предлагаемые методы расчетной оценки активного сопротивления R_c сильноточного канала воздушной искры в СВК на основе лишь исходных данных для собственного активного сопротивления R_g (без учета влияния искры СВК) ВЭФУ с мощным ЕНЭ, активного сопротивления R_l электрической нагрузки, активного сопротивления R_s измерительного шунта, удельной электропроводности γ_c плазмы в канале искры длиной l_c и АВП импульсного тока $i_d(t)$ в разрядной цепи мощной конденсаторной батареи ВЭФУ позволяют с погрешностью, характерной для инженерных расчетов, выполнять определение требуемой для составления баланса электрической энергии в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ величины R_c . Каждый из рассмотренных методов приближенного расчета R_c имеет свои определенные преимущества и недостатки.

3 Впервые введено и математически определено по (6) и (8) новое электрофизическое понятие эквивалентного активного сопротивления R_{ce} плазменного канала воздушного искрового разряда. На конкретном электрофизическом примере из области ВИТ проиллюстрировано его практическое применение для БИТ микросекундной длительности, коммутируемых высоковольтным СВК с искрой, свободно «горящей» в воздухе между его тремя массивными стальными электродами.

4 Полученные результаты могут быть использованы в области ВИТ при расчетной оценке активного сопротивления длинных воздушных сильноточных искр, сопровождающих электрической пробой воздушных промежутков в мощных высоковольтных сильноточных испытательных (моделирующих) установках мегавольтного диапазона и воздушной изоляции в объектах промышленной электроэнергетики при аварийных режимах их работы, а также протекание в воздушной атмосфере БИТ естественной и искусственной молнии.

Список литературы:

1. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
3. Накопление и коммутация энергии больших плотно-

стей / Под ред. У. Бостика., В. Нарди, О. Цукера: Пер. с англ. Э.И. Асиновского, В.С. Комелькова. – М.: Мир, 1979. – 474 с.

4. Баранов М.И. Применение новых газоразрядных и твердотельных полупроводниковых коммутаторов в сильноточных цепях мощных высоковольтных электрофизических установок / М.И. Баранов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2009. – №1. – С. 55-58.

5. Баранов М.И. Применение новых вакуумных коммутаторов в сильноточных цепях мощных высоковольтных электрофизических установок и схемах аварийной защиты силового электрооборудования / М.И. Баранов // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2009. – №3. – С. 5-10.

6. Бойко Н.И. Высоковольтные искровые разрядники для технологических установок / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов // *Приборы и техника эксперимента*. – 2001. – № 2. – С. 79-88.

7. Баранов М.И. Высоковольтные сильноточные искровые коммутаторы для генераторов импульсных напряжений и токов / М.И. Баранов, В.А. Бочаров, Ю.П. Зябка, П.Н. Мельников // *Технічна електродинаміка*. – 2003. – № 3. – С. 41-47.

8. Baranov M.I. High-Voltage High-Current Air-Filled Spark Gaps of an Artificial-Lightning-Current Generator / M.I. Baranov, G.M. Koliushko, V.I. Kravchenko, O.S. Nedzel'skii, M.A. Nosenko // *Instruments and experimental techniques*. – 2008. – Vol. 51, № 6. – P. 833-837.

9. Лозанский Э.Д. Теория искры / Э.Д. Лозанский, О.Б. Фирсов. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с.

10. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

11. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1987. – 592 с.

12. Baranov M.I. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects / M.I. Baranov, G.M. Koliushko, V.I. Kravchenko, O.S. Nedzel'skii, V.N. Dnyshchenko // *Instruments and experimental techniques*. – 2008. – Vol. 51, № 3. – P. 401-405.

13. Баранов М.И. Расчетная и опытная оценка результатов электротермического воздействия нормированного по международному стандарту IEC 62305-1-2010 импульса тока короткого удара искусственной молнии на тонкостенное покрытие из нержавеющей стали / М.И. Баранов, В.В. Князев, С.В. Рудаков // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2017. – № 1. – С. 31-38.

14. SAE ARP 5412: 2013 Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms / SAE Aerospace. USA, 2013. – P. 1-56.

15. SAE ARP 5416: 2013 Aircraft Lightning Test Methods / SAE Aerospace. USA, 2013. – P. 1-145.

16. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 3: Теория и практика электрофизических задач / М.И. Баранов. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.

17. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий / Г.А. Гулый. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с.

18. Баранов М.И. Приближенный расчет максимальной температуры плазмы в сильноточном канале искрового разряда высоковольтного воздушного коммутатора атмосферного давления / М.И. Баранов // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – № 5. – С.18-21.

Bibliography (transliterated):

1. Tehnika bol'shikh impul'snyh tokov i magnitnyh polej. Pod red. V.S. Komel'kova [The technique of large pulsed currents and magnetic fields / Ed. V.S. Komel'kov]. Moscow: Atomizdat, 1970, 472 p.
2. Knopfel H. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja [Superstrong pulsed magnetic fields]. Moscow: Mir, 1972, 391 p.

3. Nakoplenie i kommutacija energii bol'shikh plotnostej. Pod red. U. Bostika, V. Nardi, O. Cukera: Per. s angl. E.I. Asinovskogo, V.S. Komel'kova [Accumulation and commutation of energy of high densities. Ed. U. Bostik., V. Nardi, O. Tsuker: Trans. with the eng. E.I. Asinovsky, V.S. Komel'kov]. Moscow: Mir, 1979, 474 p.

4. Baranov M.I. Primenenie novykh gazorazjadnykh i tverdotel'nykh poluprovodnikovyykh kommutatorov v sil'notochnykh cepjakh moshhnykh vysokovol'tnykh elektrofizicheskikh ustanovok [Application of new gas-discharge and solid-state semiconductor switches in high-current circuits of high-voltage high-voltage electrophysical installations]. Elektrotehnika i elektromehanika—Electrical engineering & electromechanics, 2009, no. 1, pp. 40-49.

5. Baranov M.I. Primenenie novykh vakuumnykh kommutatorov v sil'notochnykh cepjakh moshhnykh vysokovol'tnykh elektrofizicheskikh ustanovok i shemah avarijnoj zashchity silovogo elektrooborudovaniya [Application of new vacuum switches in high-current circuits of high-voltage high-voltage electrophysical installations and schemes of emergency protection of power electrical equipment]. Elektrotehnika i elektromehanika – Electrical engineering & electromechanics, 2009, no. 3, pp. 5-10.

6. Boyko N.I., Evdoshenko L.S., Zarochentsev A.I., Ivanov V.M. Vysokovol'tnye iskrovyje razjadniki dlja tehnologicheskikh ustanovok [High-voltage spark gaps for process units]. Pribory i tehnika eksperimenta-Instruments and experimental techniques, 2001, no. 2, pp. 79-88.

7. Baranov M.I., Bocharov V.A., Zybko Yu.P., Mel'nikov P.N. Vysokovol'tnye sil'notochnye iskrovyje kommutatory dlja generatorov impul'snykh naprjazhenij i tokov [High-voltage high-current spark switches for generators of impulse voltages and currents]. Tekhnichna elektrodinamika-Technical electrodynamic, 2003, no. 3, pp. 41-47.

8. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Nosenko M.A. High-Voltage High-Current Air-Filled Spark Gaps of an Artificial-Lightning-Current Generator. Instruments and experimental techniques, 2008, Vol. 51, no. 6, pp. 833-837.

9. Lozansky E.D., Firsov O.B. Teorija iskry [The theory of spark]. Moscow: Atomizdat, 1975, 272 p.

10. Kuhling H. Spravochnik po fizike / Per. s nem. pod

red. E.M. Lejkina [Handbook of physics / Trans. with the ger. Ed. E.M. Leikin]. Moscow: Mir, 1982, 520 p.

11. Raiser Yu.P. Fizika gazovogo razrjada [Physics of gas discharge]. Moscow: Nauka, 1987, 592 p.

12. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. Instruments and experimental techniques, 2008, Vol. 51, no. 3, pp. 401-405.

13. Baranov M.I., Knyazev V.V., Rudakov S.V. Raschetnaja i opyt'naja ocenka rezul'tatov elektrotermicheskogo vozdejstvija normirovannogo po mezhdunarodnomu standartu IEC 62305-1-2010 impul'sa toka korotkogo udara iskusstvennoj molnii na tonkostennoe pokrytie iz nerzhavjushhej stali [Estimated and experimental evaluation of the results of the electrothermal effect of the current pulse of a short stroke of artificial lightning standardized to the international standard IEC 62305-1-2010 on a thin-walled stainless steel coating]. Elektrotehnika i elektromehanika-Electrical engineering & electromechanics, 2017, no.1, pp.31-38.

14. SAE ARP 5412: 2013 Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013, pp. 1-56.

15. SAE ARP 5416: 2013 Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013, pp. 1-145.

16. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki. T. 3: Teorija i praktika elektrofizicheskikh zadach [Selected questions of electrophysics. Vol. 3: Theory and practice of electrophysical problems]. Kharkiv: Point, 2014, 400 p.

17. Guliy G.A. Nauchnye osnovy razjadno-impul'snykh tehnologij [Scientific foundations of discharge-impulse technologies]. Kiev: Naukova dumka, 1990, 208 p.

18. Baranov M.I. Priblizhennyj raschet maksimal'noj temperatury plazmy v sil'notochnom kanale iskrovogo razrjada vysokovol'tnogo vozdušnogo kommutatora atmosfernogo davljenija [An approximate calculation of the maximum plasma temperature in a high-current channel of a spark discharge of a high-voltage air switch at atmospheric pressure] // Tekhnichna elektrodinamika-Technical electrodynamic, 2010, no.5, pp.18-21.

Надійшла (received) 20.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Наближений розрахунок активного опору плазмового каналу іскрового розряду у високовольтному сильноточному повітряному комутаторі атмосферного тиску / М.І. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 2017. № 15 (1237). – С. 5-11. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-0740.

Приближенный расчет активного сопротивления плазменного канала искрового разряда в высоковольтном сильноточном воздушном коммутаторе атмосферного давления / М.И. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 5-11. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-0740.

A close calculation of active resistance of plasma channel of a spark discharge is in a high-voltage heavy-current air switchboard atmospheric pressure / M.I. Baranov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 5-11. – Bibliogr.: 18. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Баранов Михайло Іванович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-68-41; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

Баранов Михаил Иванович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-68-41; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

Baranov Michail Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Main Researcher Research & Design Institute «Molniya» of NTU «KPI»; tel.: (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

УДК 621.317.3

М.И. БАРАНОВ, А.А. КОРОБКО**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В ЭМУЛЬСИИ ТИПА «ТРАНСФОРМАТОРНОЕ МАСЛО – ВОДА»**

Розглянуто вплив діелектричних втрат на метрологічні характеристики діелькометричного методу визначення вологовмісту у емульсії типу «трансформаторне масло – вода» в резонансному режимі. Проведено аналіз залежності систематичних похибок від резонансної частоти коливального контуру з ємнісним вимірювальним перетворювачем. Визначені величини систематичних похибок вимірювання вологовмісту у вказаній емульсії, що обумовлені впливом електропровідності чистого масла та емульсії. Наведено, що для спрощеної моделі емульсії інженерного типу в діапазоні вологовмісту $10^{-5} - 10^{-1}$ вплив діелектричних втрат у чистому маслі та емульсії є незначним.

Ключові слова: трансформаторне масло, вода, емульсія, вологовміст, діелькометричний метод, резонансний режим, діелектричні втрати, модель емульсії, ємнісний вимірювальний перетворювач.

Рассмотрено влияние диэлектрических потерь на метрологические характеристики диелькометрического метода определения влагосодержания в эмульсии типа «трансформаторное масло – вода» в резонансном режиме. Проведен анализ зависимости систематических погрешностей от резонансной частоты колебательного контура с емкостным измерительным преобразователем. Определены величины систематических погрешностей измерения влагосодержания в указанной эмульсии, которые обусловлены влиянием проводимостей обезвоженного масла и эмульсии. Показано, что для упрощенной модели эмульсии инженерного типа в диапазоне ее влагосодержания $10^{-5} - 10^{-1}$ влиянием диэлектрических потерь в обезвоженном масле и эмульсии можно пренебрегать.

Ключевые слова: трансформаторное масло, вода, эмульсия, влагосодержание, диелькометрический метод, резонансный режим, диэлектрические потери, модель эмульсии, емкостной измерительный преобразователь.

In article influence of dielectric losses on metrological characteristics dielcometric method of definition of the maintenance of water in emulsion of type «transformer oil – water» in a resonant mode is considered. The analysis of dependence of regular errors from resonant frequency of an oscillatory contour with the capacitor measuring converter is lead. Sizes of regular errors of definition of the maintenance of water in the indicated emulsion which are caused by influence of conductivity of oil of oil without water and a emulsion are determined. It is shown, that for the simplified model of a emulsion of engineering type in a range of the maintenance of water influence $10^{-5} - 10^{-1}$ of dielectric losses in clean oil and a emulsion can be neglected.

Key words: transformer oil, water, the emulsion, the maintenance of water, dielcometric method, a resonant mode, dielectric losses, model of the emulsion, capacitor the measuring converter.

Введение. Диелькометрический метод определения влагосодержания в эмульсиях типа «трансформаторное масло – вода» в резонансном режиме предполагает измерение резонансной частоты колебательного контура с использованием емкостного измерительного преобразователя (ИП). Значения резонансных частот такого контура связаны с величиной диэлектрической проницаемости исследуемого вещества (масла или эмульсии), что позволяет определять влагосодержание различных электрофизических моделей эмульсий [1]. В [2] была предложена упрощенная модель эмульсии инженерного типа, позволяющая достаточно просто решать задачу по определению ее влагосодержания на основе знания величин диэлектрических проницаемостей обезвоженного масла и исследуемой эмульсии. В данной идеализированной расчетной модели эмульсия представляла собой равномерно распределенные по объему идеального диэлектрика (масла) идеально проводящие сферы одинакового диаметра. В реальности же обезвоженное трансформаторное масло и эмульсия не являются идеальными диэлектриками, что приводит к уменьшению величины резонансных частот, обусловленных конечной проводимостью как масла, так и эмульсии.

Целью работы является анализ влияния диэлек-

трических потерь в расчетной модели эмульсии типа «трансформаторное масло – вода» на основные метрологические характеристики диелькометрического резонансного метода измерения влагосодержания в указанном жидком неполярном диэлектрике (масле).

Постановка задачи. Для инженерного решения задачи по исследованию влияния влагосодержания W в указанной эмульсии на изменение ее проводимости γ , необходимо знать распределение электрического поля по объему данной эмульсии, включающей внутри себя сферы небольшого диаметра, образованные эмульгированной в эмульсии водой. Подобная модель эмульсии в таком представлении приведена на рис. 1.

Эмульсия в рассматриваемой модели представляет собой равномерно распределенные по объему масла с диэлектрической проницаемостью ϵ_m и проводимостью γ_m миниатюрные сферы одинакового размера из воды с диэлектрической проницаемостью ϵ_v и проводимостью γ_v . Прикладываемое к электродам ИП переменное напряжение измерительного генератора (ИГ) вызывает протекание как токов смещения, вызванных диэлектрическими свойствами эмульсии, так и токов проводимости, обусловленных отличием трансформаторного масла и воды от идеальных изоляторов. Точное решение данной полевой задачи являет-

ся довольно сложным, так как распределение электрического поля в такой системе будет зависеть не только от электрофизических характеристик воды и масла, но и от частоты воздействующего поля. Поэтому для решения поставленной задачи был использован упрощенный подход, который заключается в следующем.

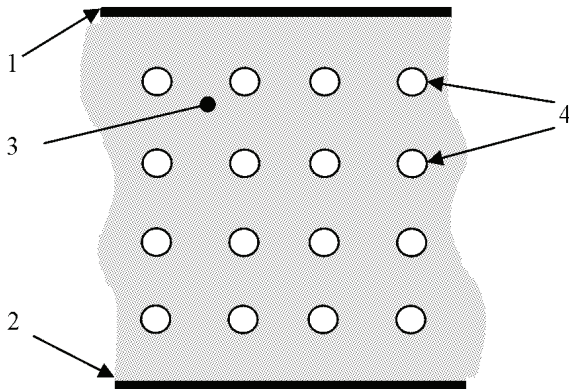


Рисунок 1 – Исходная модель исследуемой эмульсии (1,2 – электроды измерительного преобразователя; 3 – трансформаторное масло 4 – сферические включения воды)

1. Задача решается в квазистатическом приближении, когда электрофизические характеристики эмульсии и ее составных частей не зависят от частоты генерации напряжения ИГ, а распределение электрического поля по объему ИП соответствует указанному расчетному приближению.

2. Исходная модель эмульсии, представленная на рис. 1, заменяется на идеализированную расчетную модель. При этом в этой расчетной модели по аналогии с моделью эмульсии, предложенной в [2], эмульсия представляется в виде одинаковых идеально проводящих миниатюрных сфер, равномерно распределенных по объему масла с диэлектрической проницаемостью ϵ_m и проводимостью γ_m .

3. Решение задачи для идеализированной модели эмульсии, полученное для статического случая (частота ИГ равна нулю), распространяется на диапазон частот (0–1) ГГц, в котором значения диэлектрических проницаемостей трансформаторного масла и воды практически постоянны.

Решение поставленной задачи производится в два этапа. Первый этап – решение полевой задачи по определению зависимости проводимости γ_3 эмульсии от влагосодержания W в ее трансформаторном масле.

Второй этап – решение задачи по определению влияния сопротивления потерь, обусловленных неидеальностью рассматриваемых диэлектриков (масло и вода), в схеме замещения используемого RLC -контура сосредоточенного типа с емкостным ИП на резонансную частоту такого колебательного контура.

Основные расчетные соотношения. Для решения рассматриваемой задачи на первом этапе можно воспользоваться методом электростатической аналогии [3], устанавливающим связь между электрическим полем в проводящей среде и электростатическим полем в непроводящей (диэлектрической) среде с аналогичными геометрическими размерами, но с другими

физическими характеристиками. При этом проводимость γ_3 рассматриваемой эмульсии в виде непроводящей жидкости с равномерно распределенными в ней идеально проводящими сферами изменяется в зависимости от влагосодержания W точно также как и диэлектрическая проницаемость ϵ_3 эмульсии из идеально непроводящей жидкости с той же диэлектрической проницаемостью ϵ_3 и с теми же равномерно распределенными в ней идеально проводящими сферами.

Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ_3 эмульсии от величины абсолютного объемного влагосодержания W была определена ранее в виде [2]:

$$\epsilon_3 = \epsilon_m(1 + 3W). \quad (1)$$

Используя соотношение (1) и заменяя в нем указанные диэлектрические проницаемости на проводимости (с учетом метода электростатической аналогии), получаем зависимость проводимости γ_3 исследуемой эмульсии от ее влагосодержания W для идеализированной расчетной модели следующего вида:

$$\gamma_3 = \gamma_m(1 + 3W). \quad (2)$$

Для решения исследуемой задачи на втором этапе была проведена оценка влияния изменения влагосодержания W на величину проводимости γ_3 эмульсии и на частоту генерации ИГ. При этом была использована эквивалентная схема замещения колебательного RLC -контура параллельного типа с ИП, показанная на рис. 2. В данном контуре элементы C_3 и R_3 характеризуют соответствующую электрическую емкость и сопротивление потерь ИП емкостного типа, применяемого для практической реализации диэлькометрии в резонансном режиме [1,2]. Отметим, что в указанной схеме R_3 – сопротивление потерь на постоянном токе, измеренное между электродами ИП (см. рис. 1).

Принимая во внимание, что величина проводимости среды обратно пропорциональна величине ее электрического сопротивления, искомый параметр R_3 для эмульсии определяется следующим выражением:

$$R_3 = \frac{1}{\gamma_m(1 + 3W)} = \frac{R_m}{1 + 3W}, \quad (3)$$

где R_m и γ_m – сопротивление и проводимость обезвоженного масла между электродами ИП (см. рис. 1).

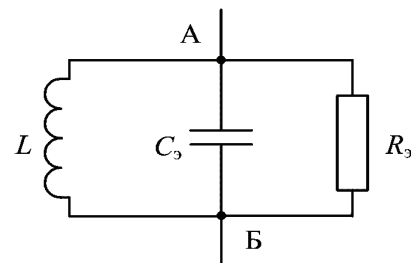


Рисунок 2 – Схема замещения резонансного контура с ИП для определения влияния влагосодержания W на величину проводимости эмульсии γ_3

Как известно, величина R_m определяется в виде:

$$R_m = \rho_m \frac{\Delta h}{S}, \quad (4)$$

где ρ_m – удельное электрическое сопротивление обезвоженного масла; Δh и S – соответственно расстояние

между электродами ИП и их площадь (для случая выполнения ИП в виде плоского конденсатора).

В нашем случае для определения величины ρ_m можно воспользоваться расчетным соотношением, связывающим диэлектрические потери в обезвоженной жидкости (масле) с ее диэлектрической проницаемостью на той же частоте генерации ИГ [4]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\rho_m \varepsilon_m \varepsilon_0 \omega}, \quad (5)$$

где δ – угол диэлектрических потерь на циклической частоте ω ; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Подставляя в выражение (5) для обезвоженного масла соответствующие усредненные значения $\varepsilon_m = 2,2$ и $\operatorname{tg} \delta = 10^{-3}$ на частоте 50 Гц [4], можно получить искоемое численное значение $\rho_m = 1,6 \cdot 10^{11}$ Ом·м. Далее, используя допущения, что для циклических частот ω значением до $\sim 10^{11} \text{ с}^{-1}$ величины $\operatorname{tg} \delta$ и ε_m для неполярных диэлектриков слабо зависят от частоты [4,5], можно использовать полученное для частоты 50 Гц значение ρ_m и для расчета величины R_m при любой другой частоте применительно к используемому нами ИП емкостного типа. Так как величины ρ_m для разных частот будут разными, то величина ρ_m на частоте f будет определяться выражением следующего вида:

$$\rho_{mf} = \rho_m \cdot \frac{50}{f}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что при $\rho_m = 1,6 \cdot 10^{11}$ Ом·м для нижнего диапазона рассматриваемых частот f , равных $\sim 0,1$ МГц и используемых в ИП, величина $\rho_{m,0,1} = 8 \cdot 10^7$ Ом·м, а для верхнего диапазона указанных частот ~ 100 МГц величина $\rho_{m,100} = 8 \cdot 10^4$ Ом·м.

Полученные значения ρ_{mf} позволяют с помощью (3) и (4) определить величину R_3 для конкретных значений Δh и S . Для определения изменения величины R_3 под действием влаги (в функции влагосодержания W) необходимо определить изменение резонансной частоты RLC -контура, представленного на рис. 2, в зависимости от влагосодержания W . Для этого схему на рис. 2 с параллельным включением резистора R_3 , характеризующего проводимость исследуемой эмульсии, преобразуем на рис. 3 в эквивалентную схему с последовательным включением сопротивления r_3 .

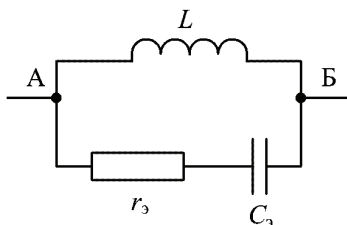


Рисунок 3 – Эквивалентная схема замещения резонансного RLC - контура с ИП для определения влияния величины r_3 на резонансную частоту контура АБ

В соответствии с [6] при малых значениях $\operatorname{tg} \delta$ для сопротивления r_3 имеем следующее соотношение:

$$r_3 = \frac{R_3}{\operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (7)$$

Для данного RLC - контура, приведенного на рис. 3, величина резонансной частоты F_3 определяется следующим расчетным соотношением [7]:

$$F_3 = F_0 \sqrt{\frac{z_0^2}{z_0^2 - \frac{r_3^2}{z_0^2}}}, \quad (8)$$

где $z_0^2 = \frac{L}{C_3}$, $F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}}$.

Для случая идеальных ИП и ИГ (с нулевыми паразитными электрическими параметрами) и для рассматриваемой идеализированной модели эмульсии [2] определяемая с помощью диэлькометрии в резонансном режиме объемная абсолютная величина влагосодержания W (с размерностью $\text{м}^3/\text{м}^3$) будет равна [1,2]:

$$W = \frac{2B}{3}, \quad (9)$$

где $B = \frac{\Delta F_\varepsilon}{F_{\text{см}}}$ – относительная девиация частоты генерации ИГ; ΔF_ε – абсолютная девиация частоты ИГ (разность резонансных частот генерации ИГ) при последовательном заполнении ИП обезвоженным маслом и исследуемой эмульсией.

Из (9) следует, что величину B находим как:

$$B = \frac{3W}{2}. \quad (10)$$

Важно отметить, что величина B характеризует девиацию резонансных частот ИГ, обусловленную исключительно влиянием влагосодержания W на резонансную частоту генерации применяемого нами ИГ.

Влияние диэлектрических потерь на частоту ИГ характеризует величина A – относительная девиация резонансной частоты ИГ за счет диэлектрических потерь. В рассмотренном случае величина A определяется как отношение абсолютной девиации частоты, обусловленной влиянием диэлектрических потерь, к «невозможному» значению резонансной частоты F_m ИГ, характерной для обезвоженного масла в ИП.

В соответствии с выражением (9) величины измеренных диэлькометрическим резонансным методом влагосодержаний W и систематических погрешностей их определения будут зависеть линейно от относительных девиаций B и A соответственно.

Аналогичным образом в соответствии с выражением (9) соотносятся и абсолютные погрешности определения абсолютного влагосодержания. Укажем, что абсолютная погрешность определения абсолютного влагосодержания W данным методом складывается из суммы погрешностей определения резонансных частот генерации ИГ для обезвоженного трансформаторного масла и эмульсии в ИП. Что касается относительной систематической погрешности определения абсолютного влагосодержания W , то она определяется как отношение суммы абсолютных погрешностей к величине измеряемого абсолютного влагосодержания.

Используя выражения (3), (4), (6) – (8) и (10) для конкретных типов ИП, работающих в диапазоне резонансных частот от 0,1 МГц ($S_{0,1} = 6,21 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $\Delta h_{0,1} = 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $z_{0,1} = 31,6 \cdot 10^3 \text{ Ом}$) [1] до 100 МГц

($S_{100} = 5,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $\Delta h_{100} = 0,95 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $z_{100} = 17,7 \text{ Ом}$) [8], были определены значения параметров A и B для величин абсолютных влагосодержаний $W = 0$ и $W = 0,1$ (относительные девиации A_0, B_0 – для значений $W = 0$; относительные девиации $A_{0,1}, B_{0,1}$ – для значений $W = 0,1$). Численные результаты данных приближенных расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Систематические погрешности определения резонансных частот генерации ИГ и абсолютного влагосодержания W с учетом диэлектрических потерь в эмульсии

№ п/п	Величина	Частота генерации ИГ, МГц	
		0,1	100
1	A_0 Относительная девиация частоты генерации ИГ, обусловленная учетом влияния диэлектрических потерь в обезвоженном трансформаторном масле (для $W = 0$).	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$0,8 \cdot 10^{-6}$
2	$A_{0,1}$ Относительная девиация частоты генерации ИГ, обусловленная учетом влияния диэлектрических потерь в эмульсии (для $W = 0,1$).	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
3	B_0 Относительная девиация частоты генерации ИГ, обусловленная наличием влаги в эмульсии без учета диэлектрических потерь (для обезвоженного трансформаторного масла с $W = 0$).	0	0
4	$B_{0,1}$ Относительная девиация частоты генерации ИГ, обусловленная наличием влаги в эмульсии без учета диэлектрических потерь (для эмульсии с $W = 0,1$).	0,15	0,15
5	$\frac{2}{3} \cdot A_0, \text{ м}^3/\text{м}^3$ Абсолютная систематическая погрешность определения абсолютного влагосодержания в обезвоженном трансформаторном масле, обусловленная учетом влияния диэлектрических потерь (для масла с $W = 0$).	$1,46 \cdot 10^{-5}$	$0,53 \cdot 10^{-6}$
6	$\frac{2}{3} \cdot A_{0,1}, \text{ м}^3/\text{м}^3$ Абсолютная систематическая погрешность определения абсолютного влагосодержания эмульсии, обусловленная учетом влияния диэлектрических потерь в эмульсии (для $W = 0,1$).	$2,53 \cdot 10^{-5}$	$0,93 \cdot 10^{-6}$
7	$2/0,3 \cdot (A_0 + A_{0,1})$ Относительная систематическая погрешность определения абсолютного влагосодержания эмульсии $W = 0,1$, обусловленная суммарным влиянием диэлектрических потерь в обезвоженном масле и в эмульсии.	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$

Выводы

1. С ростом рабочей резонансной частоты генерации ИГ величины относительных девиаций частоты ИГ, обусловленные учетом влияния проводимости масла и эмульсии, уменьшаются. Так для резонансных частот 0,1 МГц и 100 МГц относительные девиации частот генерации ИГ за счет диэлектрических потерь в обезвоженном масле численно составляют значения $2,2 \cdot 10^{-5}$ и $0,8 \cdot 10^{-6}$ соответственно.

2. Для влагосодержания $W = 0,1$ относительная девиация резонансной частоты генерации ИГ, обусловленная уменьшением этой частоты за счет проводимости обезвоженного масла и эмульсии, не превышает значения $3,8 \cdot 10^{-5}$ для частоты ИГ 0,1 МГц.

3. Для влагосодержания $W = 0,1$ относительная девиация резонансной частоты генерации ИГ, обусловленная уменьшением данной частоты за счет проводимости обезвоженного масла и эмульсии, не превышает значения $1,4 \cdot 10^{-6}$ для частоты ИГ 100 МГц.

4. Абсолютная систематическая погрешность определения абсолютного влагосодержания W , обусловленная учетом влияния диэлектрических потерь в эмульсии (для $W = 0,1$), не превосходит численного значения $2,53 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{м}^3$ для частоты ИГ 0,1 МГц.

5. Абсолютная систематическая погрешность определения абсолютного влагосодержания W , обусловленная учетом влияния диэлектрических потерь в эмульсии (для $W = 0,1$), не превышает численного значения $0,93 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{м}^3$ для частоты ИГ 100 МГц.

6. Для частоты генерации ИГ 0,1 МГц диэлькометрический метод измерения влагосодержания в резонансном режиме позволяет выполнять измерение абсолютного влагосодержания W по формуле (9) без учета диэлектрических потерь до значения W порядка $10^{-4} \text{ м}^3/\text{м}^3$.

7. Для частоты ИГ 100 МГц диэлькометрический резонансный метод измерения влагосодержания позволяет производить измерение абсолютного влагосодержания W по формуле (9) без учета диэлектрических потерь до значения W порядка $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{м}^3$.

8. При проведении измерений влагосодержания в эмульсии, меньших, чем указано в п.п. 4,5, необходимо учитывать указанные в них систематические погрешности аппаратным или программным путем.

9. Полученные данные по величинам систематических погрешностей, обусловленных влиянием диэлектрических потерь в обезвоженном масле и в эмульсии типа «трансформаторное масло – вода», позволяют определять соответствующие систематические погрешности диэлькометрического резонансного метода измерения влагосодержания W на любых резонансных частотах включительно до 1 ГГц.

10. Полученные результаты позволяют выбирать конструкцию ИП и резонансную частоту ИГ в соответствии с заданными требованиями по диапазону измерения влагосодержания W и требованиями по обеспечению достоверности их измерений.

Список литературы:

1. Рудаков В.В. Повышение чувствительности измерений содержания влаги в трансформаторном масле диэлькометрическим методом в резонансном режиме / В.В. Рудаков,

А.А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 50 (1092). – С. 143-149.

2. Рудаков В.В., Электрофизическая модель эмульсии типа минеральное масло – вода инженерного типа / В.В. Рудаков, А.И. Коробко, А.А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2009. – № 39. – С. 158-161.

3. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том 3. – 4-е изд. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 377 с.

4. Липштейн Р.А. Трансформаторное масло. 3 изд. / Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

5. Сканава Г.И. Физика диэлектриков (Область слабых полей) / Г.И. Сканава. – М.: Гос. издат., 1942. – 501 с.

6. Эпштейн С.Л. Измерения характеристик конденсаторов. 2-е изд. / С.Л. Эпштейн. – М.: Энергия, 1971. – 220 с.

7. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи / Г.И. Атабеков. – СПб.: Питер, 2009. – 592 с.

8. Рудаков В.В. Высокочувствительный СВЧ измеритель влагосодержания в неполярных диэлектрических жидкостях на основе ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора / В.В. Рудаков, А.А. Коробко // Електротехніка і електромеханіка – 2016. – №5. – С. 51-56. – doi: 20998/2-74-272X.2016.5.08

References (transliterated):

1. Rudakov V.V., Korobko A.A. Povushenie chustvivelnosti izmerenii vlagosoderzaniya v transformatornom masle dielekmetrichesk kim metodom v rezonansnom regume [Increasing the sensitivity of the moisture content measurements in transformer oil dielcometric method in resonant mode]. Visnyk NTU «KhPI» Bulletin of NTU «KhPI». 2014. no. 50 (1092), pp. 143-

149. (Rus).

2. Rudakov V.V., Korobko A.I., Korobko A.A. Elektrofizicheskaaj model velsii tipa mineralnoe maslo – voda ingenernogo tipa [Electrophysical model of behavior emulsion mineral oil – water engineering type]. Visnyk NTU «KhPI» Bulletin of NTU «KhPI». 2009. no. 39, pp. 158-161. (Rus).

3. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical bases electrical engineering]. SPb., Piter Publ., 2003. 377 p.

4. Lipshteyn R.A., Shakhnovich M.I. Transformatornoe maslo [The transformer oil]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 296 p.

5. Skanavi G.I. Fizika dielektrikov (Oblast slabykh poley) [Physics of dielektrik (Area of weak fields)]. Moscow, Gos. izdat. Publ., 1942. 501 p.

6. Epshteyn S.L. Izmereniya kharakteristik kondensatorov [Measurement of characteristics of condensers]. Moscow, Energiya Publ., 1971. 220 p.

7. Atabekov G.I. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Lineynye elektricheskie tsepi [Theoretical of a basis electrical engineering. Linear electric circuits]. SPb., Piter Publ., 2009. 592 p.

8. Rudakov V.V., Korobko A.A. Vvisokochuvstvitelnyy SVCh izmeritel vlagosoderzhaniya v nepolyarnyih daelektricheskikh zhidkostyakh na osnove stupenchatogo neodnorodnogo koaksialnogo rezonatora [High-sensitivity of the MICROWAVE a measuring instrument the maintenance of water in not polar dielectric liquids on the basis of the step non-uniform coaxial resonator]. Elektrotehnika i elektromehaniка-Electrical engineering & electromechanics, 2016, no.5, pp.51-56. (rus). doi:20998/2-74-272X.2016.5.08

Postynula (received) 15.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз впливу діелектричних втрат на метрологічні характеристики діелькометричного резонансного методу визначення вологовмісту в емульсії типу «трансформаторне масло – вода» / М.І. Баранов, О.А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 12-16. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Анализ влияния диэлектрических потерь на метрологические характеристики диелькометрического резонансного метода определения влагосодержания в эмульсии типа «трансформаторное масло – вода» / М.И. Баранов, А.А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 12-16. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Analysis of the effect of dielectric losses on the metrological characteristics of the dielcometric-resonance method for determining moisture content in an emulsion of the type «transformer oil – water» / M.I. Baranov, A.A. Korobko / Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – № 15 (1237). – С. 12-16. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Баранов Михайло Іванович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник НДПКИ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-68-41; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

Баранов Михаил Иванович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-68-41; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

Baranov Michail Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Main Researcher Research & Design Institute «Molniya» of NTU «KPI»; tel.: (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

Коробко Олександр Анатолійович – аспірант кафедри Інженерної електрофізики, НТУ «ХПІ»; тел.: +38 (093) 650-80-88; e-mail: andarleks@gmail.com

Коробко Александр Анатольевич – аспірант кафедры Инженерной электрофизики, НТУ «ХПІ»; тел.: +38 (093) 650-80-88; e-mail: andarleks@gmail.com

Korobko Aleksandr Anatolevych – graduate student of the Department of Engineering Electrophysics, NTU «KPI»; phone:+38 (093) 650-80-88; e-mail: andarleks@gmail.com.

УДК 658.264:621.373

А.Ю.БОНДАРЕНКО, А.С.КУПРИЯНОВ**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ КОТТЕДЖ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА, РАБОТАЮЩЕГО В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ**

Проведені розрахунки теплових втрат через основні огорожуючі конструкції житлового будинку для інженерно-технічного персоналу, що працює в польових умовах при випробуваннях на електромагнітну сумісність великогабаритних об'єктів. Також проведено аналіз ринку та порівняння цін сучасних теплоізоляційних матеріалів і різних методів утеплення. Результати представлені у вигляді таблиць і графіків. Утеплення будівлі за запропонованими рекомендаціями дозволить заощадити 40-68 % теплової енергії.

Ключові слова: електромагнітний імпульс, електромагнітна сумісність, мікроклімат, утеплення, житловий будинок, рольставні.

Проведены расчеты тепловых потерь через основные ограждающие конструкции жилого дома для инженерно-технического персонала, работающего в полевых условиях при испытаниях на электромагнитную совместимость крупногабаритных объектов, проведен анализ рынка и сравнение цен современных теплоизоляционных материалов и различных методов утепления. Результаты представлены в виде таблиц и графиков. Утепление здания по приведенным рекомендациям позволит сэкономить 40–68 % тепловой энергии.

Ключевые слова: электромагнитный импульс, электромагнитная совместимость, микроклимат, утепление, жилой дом, рольставни.

The results of the research were recommendations that were provided on the basis of the existing CODE on sanitary standards in Ukraine. Calculation of thickness of insulation and choice of materials was carried out according to the results of thermal calculation for the specific house where the operating personnel in the field conditions. Were considered the main ways of improving thermal comfort in buildings with a simple engineering solutions. Were described the main technologies of external insulation of buildings such as «wet», «ventilated» facade, filling cavities with bulk material. Analysis of the market was conducted allowing to make the correct choice for a minimal price. Warming of the building according to the above recommendations will save 40-68% of the thermal energy.

Keywords: electromagnetic impulse, electromagnetic compatibility, microclimate, warming, house, shutters.

Введение. Исследования фундаментального и прикладного характера в области техники и электрофизики высоких напряжений требуют габаритного экспериментального оборудования, которое возможно установить только под открытым небом в полевых условиях на специальных полигонах. Такое оборудование предназначено для проведения испытаний на электромагнитную совместимость и стойкость объектов к воздействию естественных и искусственных электромагнитных импульсов. В полевой лаборатории Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» построены и эксплуатируются генераторы импульсных напряжений на 3; 4 и 14 МВ, имитаторы мощных электромагнитных импульсов волнового и квазистатического типа, СВЧ-излучения и сверхширокополосных электромагнитных импульсов, для проведения испытаний объектов различного назначения, с рабочими объемами до 75000 м³[1, 2]. Для создания комфортных условий работы обслуживающего персонала в полевых условиях построены производственные и жилые помещения. Определенный уровень теплового комфорта этих зданий является одним из основных факторов обеспечения жизненно необходимых санитарно-гигиенических условий пребывания человека в них. В современных условиях вопрос об экономном расходовании энергетических ресурсов является актуальной задачей. К сожалению, построенные несколько десятилетий тому назад дома не обла-

дают достаточной теплоизоляцией, поэтому утепление уже существующих и строящихся домов одна из первоочередных задач в строительстве.

Цель работы. Практические рекомендации по утеплению основных конструкций эксплуатируемого жилого дома для минимизации энергетических потерь при минимальной стоимости материалов и работ.

Основная часть. Вопросы энергообеспечения жилых помещений сотрудников, работающих в полевых условиях, рассматривались в работе [3]. Для получения практических рекомендаций по снижению энергопотребления и улучшению микроклимата помещений необходимо произвести теплотехнический расчет ограждающих конструкций здания, по результатам которого выбирается материал теплоизоляции и его толщина.

Теплотехнический расчет выполняют в предположении о стационарных условиях передачи теплоты в холодный период года [4]. Объектом служат дома, в которых проживает и работает обслуживающий персонал, при проведении испытаний на электромагнитную совместимость в полевых условиях.

Значения теплотехнических характеристик, в том числе теплоизоляционных, строительных материалов в конструкциях под воздействием эксплуатационных факторов изменяются во времени и могут существенно отличаться от значений, получаемых при лабораторных испытаниях и указанных в технических условиях.

Согласно [5] для условий г. Харькова расчетная средняя температура внутреннего воздуха принимается $t_{в} = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$, расчетная температура наружного воздуха в холодный период года $t_{н} = -20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, продолжительность которого $z = 178$ суток, средняя температура наружного воздуха за отопительный период $t_{от} = -1,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Градусо-сутки отопительного периода $D = 3751 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$. При таких значениях D нормируемое сопротивление теплопередаче для окон и других ограждающих конструкций в Харькове должно быть не ниже значений указанных в табл. 3.

Исходные данные для анализа тепловых потерь и планирования работ представлены в табл. 1-3.

Таблица 1 – Геометрические параметры помещения

Название	Значение
Отапливаемая площадь	68 м ²
Площадь стен	57 м ²
Площадь окон (7 шт.)	12 м ²
Площадь потолка	68 м ²
Материал стен	Известковая штукатурка + дерево + глина + воздушная прослойка + кирпич снаружи
Окна	Однокамерные в деревянных рамах
Пол	Деревянный на лагах
Материал потолка	Известковая штукатурка +дерево + глина

Примечание: * – площадь внешних стен мала т.к. есть смежная стена, тепловые потери через которую не учитываются.

Стены. Основа несущей конструкции, имеющая большую площадь и низкие показатели сопротивлению теплопередачи, соответственно и самые большие тепловые потери.

Есть два основных способа размещения теплоизоляции: внутренняя и внешняя. У каждого типа есть свои плюсы и минусы. В работе рассмотрено внешнее утепление и его разновидность, когда утеплитель размещают в середине несущей конструкции. «Внешнее» способствует более длительному сроку эксплуатации несущих конструкций, превращает стены в аккумуляторы тепла, что, несомненно, помогает поддерживать благоприятный микроклимат при колебаниях температуры [6]. При монтаже теплоизоляции внутри, граница раздела теплой и холодной областей «перемещается» внутрь дома, вместе с ней и точка росы, где пары влаги конденсируются, что приводит к увлажнению и потере теплотехнических свойств конструкций.

Технологии наружного утепления. Технология мокрый фасад, на сегодняшний день самая распространенная технология. Конструкция содержит первичный слой клея, утеплитель, клей для армирующей сетки, финишная штукатурка, декоративная отделка. Преимущества: быстрый монтаж, эстетичный вид, умеренная цена, к недостаткам относят: невозможность монтажа при температурах ниже $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, высокие требования к качеству материалов. Наружная штукатурка плохо переносит циклы заморозки–разморозки, в связи с этим внешний вид, целостность и однородность слоя может быть нарушена. В качестве материала утеплителя могут быть использованы любые утеп-

лители, обладающие достаточной плотностью и прочностью, чтобы выдержать вес сетки и облицовочную штукатурку.

Вентилируемый фасад очень перспективная технология, обладает хорошими влагозащитными свойствами. Внешние воздействия, такие как влага, ветер и солнце никак не влияют непосредственно на утеплитель, что продлевает его срок эксплуатации. Конструкция: кронштейны для поддержки внешней облицовки, слой клея, утеплитель, ветрозащитная мембрана. Достоинства: хороший внешний вид, пожарная безопасность, нет необходимости выравнивать стены, длительный срок эксплуатации. К недостатками относят: дороговизну, сложность и длительное время монтажа, необходимость квалифицированного персонала. В качестве утеплителя могут применяться материалы, которые имеют достаточную влагонепроницаемость. Пенопласты и полиуретаны не пригодны для этой технологии, необходимыми свойствами обладают минеральные и базальтовые ваты [7].

Технология. Укладка сыпучих утеплителей применяется, когда есть несущая конструкция, которая обеспечивает форму для удерживания утеплителя. Могут использоваться для засыпки ниш, воздушных прослоек или плоских поверхностей. Преимущества: обеспечивает безшовность утеплителя, что в свою очередь хорошо сказывается на однородности теплового потока через ограждающую конструкцию, имеет низкую цену, легкость монтажа, работы может проводить низко квалифицированный персонал. Недостатками технологии является усадка материала при эксплуатации, трудно обеспечить равномерность в замкнутых объемах (зависит от материала). В качестве материала может использоваться эковата, перлит, вермикулит, пенопластовая крошка, керамзит, древесная стружка. Для потолочных конструкций преимущественна технология засыпки, т.к. цена на проведение работ существенно ниже, чем при укладке рулонных минераловатных утеплителей, что связано с необходимостью раскроить материал и каждый рулон укладывать отдельно.

Если конструкция здания содержит воздушную прослойку, она может быть использована как ниша для сыпучих утеплителей. Такой метод утепления помогает создать тепловой аккумулятор из несущих ограждающих конструкций. При этом утеплитель будет защищен от внешней среды гораздо лучше, а цена на проведение такого утепления гораздо ниже, потому что не требует отделочных фасадных работ.

Расчет сопротивления теплопередачи. Нормируемой величиной в инженерных расчетах, характеризующей теплозащитные качества ограждающих конструкций, в том числе оконных, является сопротивление теплопередачи, которое рассчитывается по формуле:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{в}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{вн}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{в}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения, Вт/(м²·°C); $\alpha_{вн}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения,

Вт/(м²·°C); δ_i – толщина *i*-го конструкционного слоя, м; λ_i – коэффициент теплопроводности *i*-го конструкционного слоя, Вт/(м·°C).

Коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{вн}$ и $\alpha_{вн}$ равны 8,7 и 23 Вт/(м²·°C) соответственно. Коэффициенты теплопроводности для различных материалов и толщин представлены в табл. 2 [5].

Таблица 2 – Коэффициенты теплопроводности для различных материалов и толщин

Название материала	Теплопроводность λ_i , Вт/(м·°C)	Толщина слоя δ_i , м	Термическое сопротивление R_i , м ² ·°C/Вт
Известковая штукатурка	0,81	0,04	0,05
Древесина сосна поперек волокон	0,18	0,07	0,39
Глина	0,87	0,05	0,06
Замкнутая воздушная прослойка	-	0,15	0,15
Кладка из керамического пустотного кирпича на цементно-песчаном растворе	0,48	0,12	0,25

Сопротивление теплопередачи наружных стен:

$$R_{0,ст} = \frac{1}{8,7} + \left(\frac{0,04}{0,81} + \frac{0,07}{0,18} + \frac{0,05}{0,82} + 0,15 + \frac{0,12}{0,48} \right) + \frac{1}{23} = 1,05;$$

$$R_{0,стен} = 1,05 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}.$$

Минимально допустимое значение сопротивления теплопередачи для первой температурной зоны для разных типов ограждающих конструкций приведены в табл. 3. Из приведенных данных следует, что ограждающие конструкции обладают недостаточным сопротивлением теплопередачи.

Для компенсации разницы между фактическими и минимально допустимыми сопротивлениями теплопередачи необходимо утеплять эксплуатируемое здание. Требуемое значение толщины утеплителя вычисляется согласно [5], по формулам:

$$R_{ут} = R_{мин} - R_0; \quad \delta_{ут} = \lambda_{ут} \cdot R_{ут}, \quad (2)$$

где $R_{ут}$ – минимально необходимое сопротивление теплопередачи утеплителя для достижения $R_{мин}$,

м²·°C/Вт; $R_{мин}$ – нормируемая величина минимального сопротивления теплопередачи, м²·°C /Вт; R_0 – расчетное значение сопротивления теплопередачи, м²·°C/Вт; $\lambda_{ут}$ – теплопроводность материала, Вт/(м·°C); $\delta_{ут}$ – необходимая толщина утеплителя, м.

Необходимое дополнительное сопротивление теплопередачи для стен равно 2,25 м²·°C/Вт, толщина утеплителя вычисленная по формуле (2) из минеральной ваты (135) равна 0,11м. В скобках здесь и далее указана плотность материала в кг/м³.

Для определения эффективности и более наглядного представления информации проведен расчет тепловых потерь за отопительный период для одного квадратного метра различных ограждающих конструкций по формуле:

$$Q_i = D \cdot \frac{24}{R_i}, \quad (3)$$

где Q_i – тепловые потери через *i*-ю ограждающую конструкцию, кВт·час/м²; D – градусо-сутки за отопительный период, °C·сут; R_i – сопротивление теплопередачи, м²·°C/Вт. Тепловые потери с площади 1 м² через непрозрачную ограждающую конструкцию без утепления $R_{0,стен} = 1,05 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ в год составят $Q_{стен} = 85,7 \text{ кВт} \cdot \text{час} / \text{м}^2$, при $R_{мин} = 3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ тепловые потери в год составят $Q = 27,3 \text{ кВт} \cdot \text{час} / \text{м}^2$, что позволит сэкономить до 68 % тепловой энергии.

Аналогичным образом рассчитаны сопротивления теплопередачи и тепловые потери за год для всех ограждающих конструкций, результаты представлены в табл. 3–5.

Все описанные технологии и материалы обеспечивают длительный срок эксплуатации ограждающих конструкций и нормативные санитарно гигиенические условия, поэтому основным критерием выбора является цена 1-го м². На рис. 1 изображена гистограмма, показывающая зависимости толщины теплоизоляции, обеспечивающей минимальное значение сопротивления теплопередачи для различных современных теплоизоляционных материалов, и цены 1 м² при различных технологиях нанесения теплоизоляции на ограждающие конструкции.

Таблица 3 –Теплотехнические показатели ограждающих конструкций

Тип ограждающей конструкции	Сопротивление теплопередачи, м ² ·°C/Вт			Тепловые потери за год, кВт·час/м ²		Экономия тепловой энергии, %
	Минимально допустимое, $R_{мин}$	Расчетное значение, R_0	Дополнительно требуется, $R_{ут}$	Фактические с R_0	Соответствующие $R_{мин}$	
Внешние стены	3,3	1,05	2,25	85,7	27,3	68
Чердачные перекрытия	4,95	2,3	2,65	34,0	18,2	46
Окна	0,45	0,27	0,18	333,3	200,0	40
Полы	3,6	3,75	-	25,0	24,3	-

Из гистограммы, построенной по результатам расчетов, видно, что 7-й столбец является оптимальным по теплофизическим характеристикам на единицу цены, что соответствует технологии «Заполнение воздушных прослоек» материал перлит (70) толщиной от 9,4 см, цена 147 грн/м², на втором месте та же технология с использованием материала «Эковата» (50) цена составляет 164 грн/м². При отсутствии

воздушных прослоек оптимальным является использование технологии «мокрый фасад», при этом рациональным будет использование пенопласта (50) толщиной от 9,5 см, цена составляет 214 грн/м², это на 31 % дороже, чем при задувке внутренних полостей перлитом. При использовании технологии «Вентилируемый фасад», цена составит 377 грн/м² и является самой дорогой среди представленных.

Таблица 4 – Данные для стен

Тип наружного утепления	Название материала	$\lambda_{ут}$, Вт/(м ² ·°C)	$\delta_{ут}$, м	Цена грн/м ²
Вентилируемый фасад	Минеральная вата (45)	0,043	0,10	377
Мокрый фасад	Минеральная вата (135)	0,047	0,11	344
Мокрый фасад	Экструдированный-пенополистерол (30)	0,030	0,07	292
Мокрый фасад	Пенопласт (50)	0,042	0,10	214
Внутреннее	Эковата (50) [8]	0,053	0,12	164
Внутреннее	Перлит(70) [9]	0,055	0,125	147

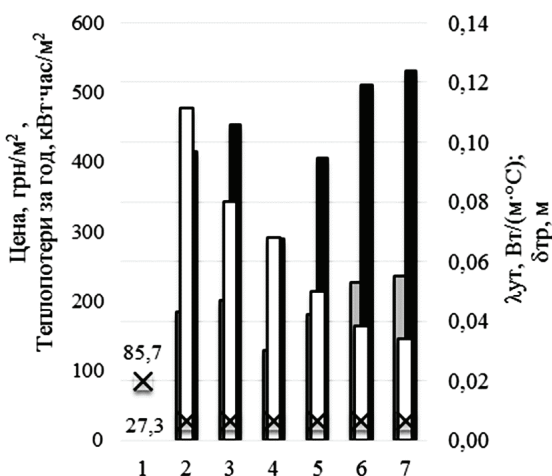


Рисунок 1 – Сравнение цен современных теплоизоляционных материалов и различных методов утепления:

1 – до проведения утепления; 2 – технология «Вентилируемый фасад», материал: минеральная вата (45); 3,4 и 5 – технология «Мокрый фасад», материалы: минеральная вата (135), экструдированный пенополистерол(30), пенопласт (50); 6,7 – технология «Заполнение воздушных прослоек», материалы «Эковата» (50), перлит (70); белые столбцы – это цена за 1м² утепления ограждающей конструкции обеспечивающая $R_{тр}$, грн/м²; черные столбцы – необходимая толщина утеплителя $\delta_{ут}$, м; серые столбцы – теплопроводность материала $\lambda_{ут}$, Вт/(м²·°C). Кресты соответствуют тепловым потерям через 1м² ограждающей конструкции за отопительный сезон, кВт·час/м²

Потолок. Тепловые потери через потолочные конструкции больше, чем через вертикальные непрозрачные ограждающие, т.к. тепло поднимается вверх и покидает помещение. В рассматриваемом случае потолочные конструкции имеют большую площадь 68 м² и недостаточное сопротивление теплопередачи $R_{пот.} = 2,3 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Необходимое дополнительное сопротивление теплопередачи равно 2,65 м²·°C/Вт, а толщина утеплителя из минеральной ваты(45), рассчитанная по формуле (2) равна 0,11 м.

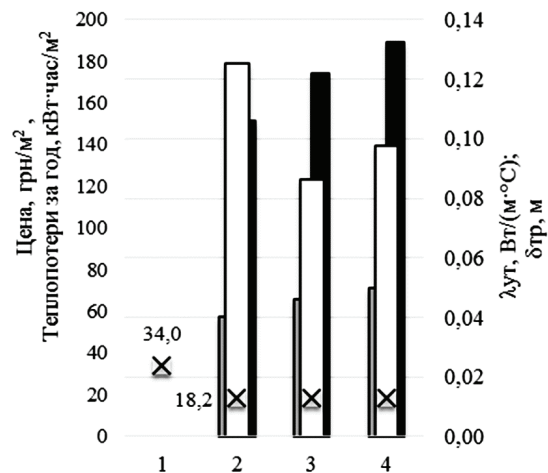
В таблице 5 приведены результирующие данные для наружного утепления потолка, рассчитанные по формулам (1) и (2). Основным параметром расчета являлась толщина необходимого слоя для каждого конкретного вида теплоизоляции. При проведении

наружного утепления для всех материалов снижение тепловых потерь за год с одного квадратного метра площади составит 18,2 кВт·час/м², что позволит сократить расходы на отопление на 46 %.

Таблица 5 – Данные для потолка

Тип утеплителя	Название материала	$\lambda_{ут}$, Вт/(м ² ·°C);	$\delta_{ут}$, м;	Цена, грн/м ²
Рулонный	Минеральная вата (35)	0,040	0,11	179
Насыпной	Эковата (50)	0,046	0,12	123
Насыпной	Перлит (70)	0,05	0,13	140

По результатам расчетов построена гистограмма рис. 2, на которой приведены зависимости толщины и цены 1 м² теплоизоляционных материалов при разных технологиях укладки на потолочные конструкции для достижения необходимого сопротивления теплопередачи.

Рисунок 2 – Сравнение цен современных теплоизоляционных материалов для потолочных конструкций и различных методов утепления: 1 – без утеплителя; 2 – рулонный утеплитель минеральная вата (35); 3 – насыпной утеплитель из эковаты (50); 4 – насыпной утеплитель перлит (70); белые столбцы – это цена утепления 1м² для обеспечения $R_{мин}$, грн/м²; черные столбцы – необходимая толщина утеплителя $\delta_{ут}$, м; серые столбцы – теплопроводность материала $\lambda_{ут}$, Вт/(м²·°C); кресты соответствуют тепловым потерям через 1м²ограждающей конструкции за отопительный период, кВт·час/м²

Насыпная технология имеет минимальную цену на единицу площади, требует минимальных затрат времени, обеспечивает хорошую равномерность сопротивления теплопередачи, безшовность теплоизоляционной оболочки. Наилучшим является насыпка из эковаты (50), цена составляет 123 грн/м², далее по привлекательности, при той же технологии, перлит (70), цена 139,5 грн/м² и на последнем месте утепление при использовании рулонной минеральной ваты (35), цена 179 грн/м².

Окна. Процесс теплообмена через оконный блок проходит через светопрозрачное заполнение – стекло и профиль – рама. Теплопередача через воздушные прослойки осуществляется излучением, конвекцией и теплопроводностью. Составляющие потока тепла че-

рез стеклопакет следующие: около 65% за счет лучистого теплообмена (излучения), около 20% за счет теплопроводности и около 15% – конвекцией [4].

Большая часть тепловых потерь приходится на излучение, эту составляющую можно уменьшить благодаря использованию Low-E покрытий [10], которые наносятся на внутреннюю поверхность стекол и играют роль экрана для теплового излучения. Также могут быть использованы рольставни, которые помимо отражения части тепловой энергии, обратно внутрь помещения, создают воздушную прослойку, что в свою очередь увеличивает сопротивление теплопередачи оконного блока в целом.

Расчет дополнительного сопротивления теплопередачи выполнен согласно [11] в зависимости от типа рольставень, их наполнения и уплотнителей. Цены и теплофизические характеристики взяты с сайтов производителей [12–13], тепловые потери за отопительный период рассчитывались по формуле (3).

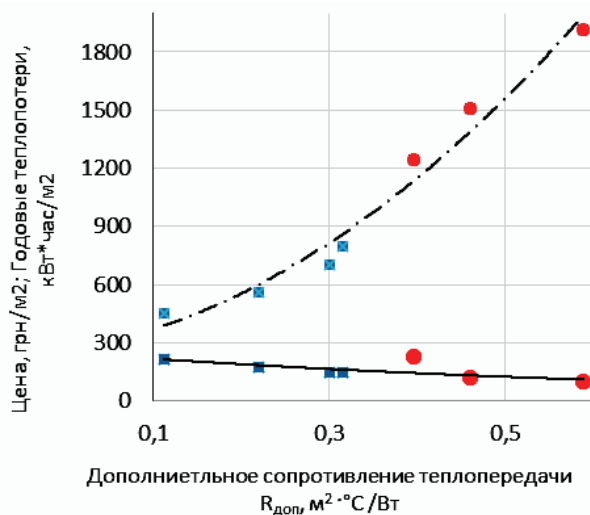


Рисунок 3 – Характеристики рольставень: штрихпунктирная линия – цена 1-го m^2 рольставни от дополнительного сопротивления теплопередачи $R_{доп}$ ($m^2 \cdot ^\circ C / Вт$); сплошная линия – зависимость тепловых потерь за отопительный период с $1 m^2$ от сопротивления теплопередачи; точки – теплые рольставни, внутренние полости (8-14 мм) которых наполнены экструдированным пенополистиролом ($\lambda = 0,025 Вт/м \cdot ^\circ C$); квадраты – рольставни (5-6 мм) без наполнения

Результаты анализа оконных конструкций [14-16] и дополнительного сопротивления теплопередачи при использовании рольставень показаны на рис. 4.

Если не выполнять замену оконных конструкций, то наилучшим выбором будут простые рольставни (5мм) без наполнителей, $R_{доп} = 0,22 m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, цена 560 грн/ m^2 , они обеспечат должный уровень сопротивления теплопередачи, в сравнении с дорогими утепленными $R_{доп} = 0,4 m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, цена 1200 грн/ m^2 .

Замена оконного блока на самый дешевый однокамерный без покрытий не имеет смысла, цена 438 грн/ m^2 , сопротивление теплопередачи на $0,04 m^2 \cdot ^\circ C / Вт$ больше, чем у существующего. Необходимое сопротивление теплопередачи может обеспечить однокамерный стеклопакет с Low-E покрытием

$R_{min} < R_{ок} = 0,59 m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, цена 533 грн/ m^2 . Экономия тепловой энергии составит 40% за отопительный период с $1-го m^2$. Наилучшими удельными теплофизическими характеристиками обладает двухкамерный стеклопакет с использованием Low-E покрытий на обоих стеклах, при заполнении инертным газом (Ar) пространства между стеклами. Полное сопротивление тепло-передачи составляет $1,1 m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, что в 2,4 раза превышает необходимое, цена 800 грн/ m^2 . Если использовать рольставни и новые окна, лучшим вариантом будут двухкамерные стеклопакеты с Low-E покрытием без наполнения газом, $R_{ок} = 0,59 m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, цена составляет 533 грн/ m^2 , и простые рольставни $R_{доп} = 0,22 m^2 \cdot ^\circ C / Вт$. Сопротивление теплопередачи такой комбинации будет больше нормируемого, а минимальная цена порядка 1190 грн/ m^2 , экономия тепловой энергии за отопительный период может достигать 67%. Установка теплых рольставень в комбинации с «холодными» окнами дороже по сравнению с установкой газонаполненных стеклопакетов, оснащенных Low-E покрытиями, на 40%, поэтому необходимо произвести замену окон для повышения качества микроклимата. Это позволит сократить расходы тепла на 40-75 %, при затратах 533-800 грн/ m^2 .

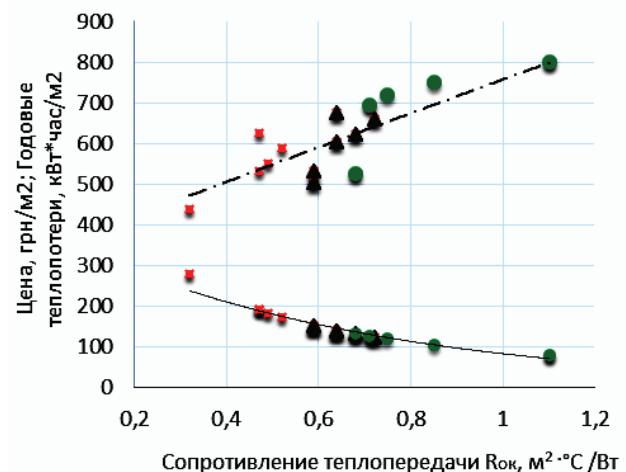


Рисунок 4 – Характеристики оконных конструкций: штрихпунктирная линия – зависимость цены $1 m^2$ стеклопакета от сопротивления теплопередачи R ($m^2 \cdot ^\circ C / Вт$); сплошная линия – зависимость тепловых потери за отопительный период с $1 m^2$ от сопротивления теплопередачи $R_{ок}$ ($m^2 \cdot ^\circ C / Вт$); квадратный маркер – обычные стеклопакеты (24-44 мм), треугольные маркеры – стеклопакеты (24-44 мм) с Low-E покрытиями, круглые маркеры – стеклопакеты (24-44 мм) с Low-E покрытием заполненные инертным газом (Ar)

Выводы

1. Утепление стен эксплуатируемого здания необходимо проводить снаружи, что позволяет превратить их в аккумулятор тепла, перенести большой перепад температур из основного массива стены в утеплитель и переместить точку росы ближе к наружному краю ограждающей конструкции.

2. Пустоты в конструкциях здания необходимо использовать, как пространство для засыпки утеплителя, дополнительное сопротивление теплопередачи при этом до 15 раз больше того, что дает воздушная

прослойка, а цена такой технологии утепления самая низкая.

3. Для утепления окон наиболее оптимальным является замена оконного блока на стеклопакет с Low-E покрытием.

4. Расчеты показали, что благодаря достижению нормируемой величины минимального сопротивления теплопередачи, экономия тепловой энергии в эксплуатируемом здании составит от 40 до 68 %. Лучшим утеплителем для стен является перлит (70), для потолка эковата (50). Технология их монтажа простая, имеет минимальную цену на единицу площади и обеспечивает длительный срок эксплуатации ограждающих конструкций и требуемые санитарно-гигиенические условия.

Список литературы:

1. Кравченко В.И. Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» на рубеже тысячелетий / Под общ. ред. проф. В.И. Кравченко. – Х.: Изд. «НТТМ», 2014. – 388 с.
2. Гладков В.С. Ретроспектива созданных НИПКИ «Молния» обострителей мегавольтных импульсов напряжения / В.С. Гладков, А.А. Гученко, А.В. Шестериков, Л.В. Ваврив // Вісник НТУ «ХП». Тем. вип. Електроенергетика і перетворююча техніка. – Х.: НТУ «ХП». – 2004. – № 35. – С. 21-29.
3. Бондаренко А.Ю. Экспериментальный стенд для исследования характеристик прозрачных материалов для гелиоколлекторов / А.Ю. Бондаренко, Р.А. Рылский // Вісник НТУ «ХП». Тем. вип. Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП». – 2011. – № 16. – С. 22-29.
4. Мхитарян Н.М. Энергосберегающие технологии в жилищном и гражданском строительстве / Н.М. Мхитарян. – К.: Наукова думка, 2000. – 420 с.
5. Державні будівельні норми України. Конструкції будинків і споруд Теплова ізоляція будівель. : ДБН В.2.6-31 :2006. – [Чинний від 2006-01- 01]. – К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2006. – IV, 73 с. – (Національний стандарт України).
6. Умнякова Н.П. Как сделать дом теплым. Справочное пособие / Н.П. Умнякова. – М.: Стройиздат, 1992. – 320 с.
7. Каммерер И.С. Теплоизоляция в промышленности и строительстве / И.С. Каммерер. – М.: Стройиздат, 1965 – 342 с.
8. «Юнизол» утеплитель [Электронный документ] // компания ООО «Юнизол», К.: 2010-2017. URL: <http://unizol.com.ua/index11.html/>. (Дата обращения: 01.12.2016).
9. Циммерман Р. Металлургия и металловедение / Р. Циммерман, К. Гюнте // ред. Дж. Вэн Райзин. – М.: Металлургия, 1982. – 480с.
10. Гоффин А. Low-E покрытия / А. Гоффин // Строительные технологии. – ТНУ, К. 28 октября 2010. – Режим доступа: <http://www.windowstec/m/articles/?id=107>. – (Дата обращения: 01.11.2016).
11. Колысов В.Н. Жалюзи и ставни / В.Н. Колысов // Строительная орбита. – 2010. – № 9. – С. 57–62.
12. Прайс цен на продукцию SDS Group [электронный документ] // Компания SDS Group X., 2002-2017 URL: <http://www.rolets.ua/rolstaven.html/> (Дата обращения: 01.11.2016).
13. Рольставни, рулонные автоматические ворота, прайс компании Alutech [Электронный документ] // Компания Alutech, К. 2001-2017. URL: <http://rolstavni-alutech./rolstaven.com/>. (Дата обращения: 18.11.2016).

14. Прайс на окна [Электронный документ] // Представительство компании ROTOX в Украине, К. 2006-2017. URL: <http://rotox-steklo/plusbs.ua/?act=viewrazdel&razdel=5/>. (Дата обращения: 01.12.2016).

15. Прайс на оконную продукцию ВДС [Электронный документ] // Компания Miroplast (WDS) К., 1998-2017. URL: <http://wds.ua/ru/продукция/оконные-и-дверные-системы/>. (Дата обращения: 01.12.2016)

16. Прайс на окна [Электронный документ] // Компания Veka представитель немецкой продукции URBAN, HOLLINGER. К., 2003-2017. URL: <http://veka-bc.com/g6605349-steklopakety-okna/092price/>. (Дата обращения: 18.12.2016)

References (transliterated):

1. Kravchenko V.I. Nauchno-issledovatel'skiy i proektno-konstruktorskiy institut «Molniya» na rubezhe tysyacheletiy [Scientific-research and design Institute "Lightning" at the turn of the Millennium]. Pod obshch. red. Prof. V.I. Kravchenko. Kharkiv: Izd. «NTTM», 2014. 388 p.
2. Gladkov V.S., Guchenko A.A., Shesterikov A.V., Vavriv L.V. Retrospektiva sozdannykh NIPKI «Molniya» obostriteley megavolt'nykh impul'sov napryazheniya [Retrospective created NIPKI "Lightning" obstacles megavolt voltage pulses]. Visnik NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Seriya: tem. vip.: Elektroenergetika i peretvoryuyucha tekhnika. Kharkiv NTU "KhPI", 2004, no. 35, pp. 21-29.
3. Bondarenko A.Yu., Ryl'skiy R.A. Eksperimental'nyy stend dlya issledovaniya kharakteristik prozrachnykh materialov dlya geliokollektorov [Experimental setup to study the characteristics of transparent materials for solar collectors] // Visnik NTU "KhPI". [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Tem. vip.: Tekhnika i elektrofizika visokikh naprug. – Kharkiv NTU "KhPI", 2011, no. 16, pp. 22-29.
4. Mkhitarjan N.M. Energoberegayushchie tekhnologii v zhilishchnom i grazhdanskom stroitel'stve [Energy saving technologies in housing and civil construction]. Kiev: Naukova dumka, 2000. 420 p.
5. Derzhavni budivel'ni normy Ukrayiny. Konstruktsiyni budynkiv i sporud Teplova izolyatsiya budivel. [The state construction norms of Ukraine. Design of buildings Thermal insulation of buildings] : DBN V.2.6- 31 :2006. [Chynnyy vid 2006-01- 01]. Kyiv: Ministerstvo budivnytstva, arkhitektury ta zhytlovo-komunal'noho hospodarstva Ukrayiny, 2006. vol. IV, 73 p. (Natsional'nyy standart Ukrayiny).
6. Umnyakova N.P. Kak sdelat' dom teplym. Spravochnoe posobie [How to make a house warm. Handbook]. Moscow: Stroyizdat, 1992. 320 p.
7. Kammerer I.S. Teploizolyatsiya v promyshlennosti i stroitel'stve [Thermal insulation in industry and construction]. Moscow: Stroyizdat, 1965. 342 p.
8. "Yunizol". uteplitel' ["Cellulose". insulation]. Kompaniya ООО "Yunizol". Available at: <http://unizol.com.ua/index11.html/>. (accessed 01.12.2016).
9. Tsimmerman R., Gyunte K. Metallurgiya i metallove-denie [Metallurgy and metallography]. Moscow: Metallurgiya 1982. 480 p.
10. Goffin A. Low-E pokrytiya [Low-E cover]. Stroitel'nye tekhnologii THW, Kyiv: 2010, no. 28 october 2010, pp. 33–37. Available at: <http://www.windowstec/m/articles/?id=107> (accessed 01.11.2016)
11. Kolysov V.N. Zhalyuzi i stavni [Blinds and shutters]. Stroitel'naya orbita [Construction orbit]. 2010. No 9. pp. 57-62.
12. Prays tsen na produktsiyu SDS Group [Prices of products SDS Group]. Kompaniya SDS Group. Available at: <http://www.rolets.ua/rolstaven.html> (accessed 01.11.2016).
13. Rol'stavni, rulonnye avtomaticheskie vorota, prays

kompanii Alutech [Shutters, roller shutters automatic gates, the price of the company Alutech]. Kompaniya Alutesh. Available at: <http://rolstavni-alutech.rolstaven.com/> (accessed 18.11.2016).

14. Prays na okna [Price list for windows]. Predstavitel'stvo kompanii ROTOX v Ukraine. Available at: <http://rotosteklo/plusbs.ua/?act=viewrazdel&razdel=5/> (accessed 01.12.2016).

15. Prays na okonnuyu produktsiyu WDS [Price list for

window products VDS]. Kompaniya Miroplast (WDS). Available at: <http://wds.ua/ru/produktsiya/okonnnye-i-dvernye-sistemy> (accessed 01.12.2016).

16. Prays na okna [Price list for windows]. Kompaniya Veka predstavitel' nemetskoj produktsii URBAN, HOLLINGER. Available at: <http://veka-bc.com/g6605349-steklopakety-okna/092price/> (accessed 18.12.2016).

Поступила (received) 22.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Енергозберігаючий будинок для інженерно-технічного персоналу, що працює в польових умовах / О. Ю. Бондаренко А. С. Купріянов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 17-23. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-0740.

Энергосберегающий коттедж для инженерно-технического персонала, работающего в полевых условиях / А. Ю. Бондаренко, А. С. Куприянов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 17-23. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-0740.

Energy saving cottage for engineering personnel working in the field / A. Yu. Bondarenko, A. S. Kupriyanov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 17-23. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бондаренко Олександр Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, НТУ «ХПІ»; тел.: (057)7076245; e-mail: abondarenko51@gmail.com.

Бондаренко Олександр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, НТУ «ХПИ»; тел.: (057)7076245; e-mail: abondarenko51@gmail.com.

Bondarenko Aleksandr Yurevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, NTU "KhPI"; tel: (057)7076245; e-mail: abondarenko51@gmail.com.

Купріянов Антон Сергійович – студент, НТУ «ХПІ»; тел.: (057)7076245; e-mail: daff@email.ua

Куприянов Антон Сергеевич – студент, НТУ «ХПИ»; тел.: (057)7076245; e-mail: daff@email.ua.

Kupriyanov Anton Sergeevich – Student, NTU "KhPI"; tel.: (057)7076245; e-mail: daff@email.ua.

УДК 621.35.035 : 621.365

Л.В. ВАВРІВ, В.М. ІВАНОВ, В.Є. МАРЦЕНЮК, Р.С. МІРЗОЄВ

ПРИСТРОЇ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ІМПУЛЬСІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ

Розглянуто основні питання, які вирішуються фізикою і технікою генерації періодичних високовольтних імпульсів мікро-мілісекундного діапазону тривалості. Розглянуті схеми пристроїв, принципи і способи отримання високої напруги можуть бути використані при розробці нових і вдосконаленні електротехнологічних установок різного призначення, але безпосереднє застосування розглянутих схем пристроїв для живлення нових високовольтних електрофізичних установок можливо тільки після вдосконалення таких пристроїв з урахуванням вимог до конкретної електротехнології.

Ключові слова: високовольтний імпульс, ємнісний накопичувач енергії, індуктивний накопичувач енергії, високовольтний генератор імпульсів.

Рассмотрены основные вопросы, решаемые физикой и техникой генерации периодических высоковольтных импульсов микро-миллисекундного диапазона длительностей. Рассмотренные схемы устройств, принципы и способы получения высокого напряжения могут быть использованы при разработке новых и совершенствовании електротехнологических установок различного назначения, но непосредственное применение рассмотренных схем устройств для питания новых высоковольтных электрофизических установок возможно только после усовершенствования таких устройств с учетом требований к конкретной електротехнологии.

Ключевые слова: высоковольтный импульс, емкостной накопитель энергии, индуктивный накопитель энергии, высоковольтный генератор импульсов.

The main problems solved by physics and technique of generation of periodic high-voltage pulses of a micro-millisecond range of durations are considered. The considered circuits of devices, principles and methods for obtaining high voltage can be used in the development of new and improvement of electrotechnological installations for various purposes, but the direct application of the considered circuits of devices for feeding new high-voltage electrophysical units is possible only after the improvement of such devices, taking into account the requirements for specific electrotechnology.

Keywords: High-voltage pulse, capacitive energy storage, inductive energy storage, high-voltage pulse generator.

Вступ. Розвиток сучасної радіоелектроніки та прикладної фізики призвело до розширення застосування потужних високовольтних квазіпрямокутних імпульсів мікро-мілісекунди тривалості. Потужні електрофізичні і модулюючі імпульси застосовуються в установках термоядерного синтезу, прискорювачах елементарних частинок і найрізноманітніших електрофізичних пристроях для отримання інтенсивних електричних і магнітних полів, генерації ударних хвиль в рідинах, дослідження електричної міцності діелектриків і середовищ і так далі.

Специфіка високих напруг і потужної імпульсної техніки, різко звужує межу і номенклатуру застосовуваної елементної бази і одночасно підвищує технологічні вимоги до вузлів і елементів пристроїв, призводить до важко переборним фізичним, технологічним і економічним перешкодам, часто зупиняє впровадження в практику, здавалося б, працездатних ідей. Ця ж специфіка практично виключає механічне перенесення сучасного найширшого досвіду низьковольтної радіоелектроніки в високовольтну техніку. Тому експериментальний досвід в даній області має особливу ціну.

Проблеми генерації, формування та трансформації потужних коротких імпульсів регулярно обговорюються на щорічних міжнародних симпозиумах в Європі, Азії та США, їх актуальність підтверджується численними щорічними конференціями по прискорювачах елементарних частинок з обов'язковими секціями імпульсно-високовольтної тематики.

Побудова сучасних потужних імпульсних генераторів досить різноманітно і визначається в першу чергу видами і режимами застосовуваних накопичувачів енергії (НЕ) і комутуючих приладів. Різні поєднання накопичувачів і комутаторів при вдалому схемному побудові дають можливість отримувати необхідні параметри вихідних імпульсів [1].

За своєю значимістю з безлічі проблем, що вирішуються фізикою і технікою генерації потужних періодичних високовольтних імпульсів мікро-мілісекундного діапазону тривалості, поряд зі створенням економічних високовольтних комутаторів виділяються:

- створення ефективних формуючих і формуючотрансформуючих ємнісних, індуктивних і індуктивно-ємнісних НЕ, а також пристроїв і ланцюгів пасивної і активної корекції форми коротких імпульсів;
- пошук шляхів скорочення габаритів, ваги та вартості генеруючих пристроїв;
- дослідження підвищувальної і понижувальної трансформації квазіпрямокутних імпульсів насамперед трансформаторами з феро осереддям;
- створення пристроїв, що генерують потужні періодичні квазіпрямокутні імпульси прецизійної форми з особливо крутими фронтами і зрізом і дуже малою нерівномірністю вершини;
- вирішення комплексу задач, пов'язаних зі створенням пристроїв, що генерують потужні і надпотужні по можливості більш короткі періодичні імпульси при індуктивному накопиченні енергії.

Індуктивні накопичувачі багаторазово перевершують ємнісні накопичувачі по питомій енергії, що

запасується, що різко зменшує їх порівняльні габарити, вагу і вартість. Для отримання високовольтних імпульсів за допомогою індуктивних НЕ не потрібні джерела живлення високої напруги. Однак для їх застосування необхідні швидкодіючі високовольтні розмикаючі комутатори періодичної дії з малим внутрішнім опором, розробка яких для високих рівнів потужності досі є невирішеною проблемою.

Широкого застосування індуктивних НЕ слід очікувати лише при впровадженні в область генерації потужних періодичних імпульсів техніки надпровідників, які дозволяють збільшити постійну часу НЕ, а також при істотному прогресі в техніці розривних напівпровідникових комутаторів. Проте параметри сучасних замикаються тиристорів, польових транзисторів і біполярних транзисторів з ізольованому затвором вже зараз дозволяють ефективно використовувати індуктивні НЕ для генерації з вихідним імпульсним трансформатором високовольтних мікросекундних періодичних імпульсів малої і середньої потужності.

На відміну від індуктивних широко застосовуються ємнісні НЕ. Використовуються як повний, так і частковий режими розряду ємнісних накопичувачів енергії.

Для отримання електрофізичних квазіпрямокутних імпульсів прецизійної форми застосовуються двоключові генератори з частковим розрядом ємнісних НЕ і м'якими комутаторами. Простота зміни тривалості імпульсу є одним з важливих переваг таких генераторів. Використання в якості НЕ накопичувальної ємності або штучної лінії коригованій по фронту тривалості фронту і зрізу вихідних імпульсів визначається часом включення комутаторів. Генерація потужних імпульсів сучасних параметрів неможлива без застосування високовольтних імпульсних трансформаторів (ІТ). Потужні ІТ з феро осереддям широко застосовуються в якості вихідних пристроїв в м'яких генераторах або використовуються для міжкаскадного зв'язку. Отримана форма вихідних імпульсів багато в чому визначається властивостями ІТ, особливо при великому коефіцієнті трансформації. Застосування вихідних підвищуючих ІТ дозволяє різко скоротити габарити, вагу і вартість генеруючих пристроїв [2], хоча і негативно впливає на форму прямокутних імпульсів, збільшуючи відносні тривалості фронту, зрізу і нерівномірність вершини. У зв'язку з цим величина коефіцієнта трансформації K_T сучасних вихідних ІТ при тривалості імпульсів в одиниці і десятки мікросекунд зростає до 10-20 і більше [3].

Принципи формування імпульсів високої напруги або струму. Основним принципом створення імпульсних високовольтних джерел є принцип накопичення електромагнітної енергії в ємнісному (конденсатори з малою індуктивністю і формуючи лінії) або індуктивному накопичувачі з подальшою передачею енергії в навантаження.

Найбільшого поширення набув принцип запасання електричної енергії в ємнісному накопичувачі - конденсаторної батареї. Цей принцип відносно простий: порівняно повільно енергія накопичується в спе-

ціальному пристрої, а потім за допомогою замикаючого комутатора вона швидко передається в навантаження. Таким чином, при малій тривалості імпульсу навіть при невеликих енергіях можна отримати гігантські потужності.

Принцип з використанням індуктивного накопичувача використовується при отриманні високовольтних імпульсів для потужної імпульсної техніки. Щільність енергії, що запасється в індуктивних накопичувачах, на два порядки більше, ніж в ємнісних, а, отже, менше вартість накопичувачів. Імпульсна напруга, що отримують на виході при обриві струму, при цьому може бути значно вище, ніж напруга на попередній стадії формування імпульсу. При цьому слід мати на увазі, що при мегавольтному рівні напруги обірвати струм кілоамперного діапазону значно складніше, ніж швидко замкнути комутатор.

Пристрої для отримання високої напруги. Існують різні пристрої для отримання високої напруги в електротехнологіях згідно принципів накопичення електромагнітної енергії. При розгляді пристроїв наведені їх основні відмінні або характерні ознаки, а також наведені дані по вихідним напруженням, струмім, частоті проходження імпульсів, і які носять узагальнений характер [4-6]. Оскільки форма вихідного сигналу, що отримують пристроями для отримання високої напруги для кожного пристрою індивідуальна і є основним параметром пристроїв, то представлені осцилограми вихідних сигналів мають узагальнений вид. Осцилограми напруги отримані в результаті моделювання електромагнітних процесів за допомогою програм комп'ютерного моделювання LTspice, Electronic Workbench, проведення експериментів або взяті з літературних джерел [7-19].

Схеми джерел високої напруги, що використовують в якості накопичувача енергії ємнісні накопичувачі енергії (конденсатори). Імпульсне джерело напруги, запропоноване В.К. Аркадьєвим і Е.Марксом, складається з системи резистивно-ємнісних ланцюжків і комутуючих (іскрових або напівпровідникових) елементів і його схема зображена на рис. 1. Принцип збільшення (множення) напруги полягає в паралельному заряді накопичувальних елементів (C_1) через зарядні резистори (R_a , R_2) від джерела напруги (E) і з послідовним з'єднанням в розрядний ланцюг за допомогою комутуючих елементів (VS_1) при формуванні імпульсу напруги. При цьому вихідна напруга складається (множить) і залежить від кількості накопичувальних елементів. Напруга $U = n \times U_1$ (U_1 – напруга заряду конденсатора ступені) на виході джерела може досягати значень мегавольтного діапазону при цьому струм до одиниць кілоампер, а частота проходження імпульсів до 10 імпульсів / с [13].

Пристрій для отримання високої напруги на конденсаторах зі змінною величиною ємності ($C_i > C_{i+1}$) складається з системи послідовно включених конденсаторів з різною ємністю, які розділені діодами. Принцип збільшення напруги полягає в наступному: при заряді накопичувальних конденсаторів C від дже-

рела змінної напруги U_1 відбувається передача енергії по послідовному ланцюжку і тим самим поступове підвищення вихідної напруги. Вихідна напруга залежить від відношення максимальної C_{max} величини ємності конденсатора до мінімальної C_{min} величини ємності конденсатора [10]. Граничне значення напруги для даної схем становить 100 кВ, струм 10^{-3} А. Якщо в даній схемі паралельно конденсатору підключити комутатор FV , то при перевищенні напруги на конденсаторі напруги пробою комутатора, відбувається передача енергії в навантаження R_H . Після цього подається нова частина енергії від джерела E і процес повторюється. Частота проходження таких імпульсів невелика і становить 0,1–10 імпульсів/с.

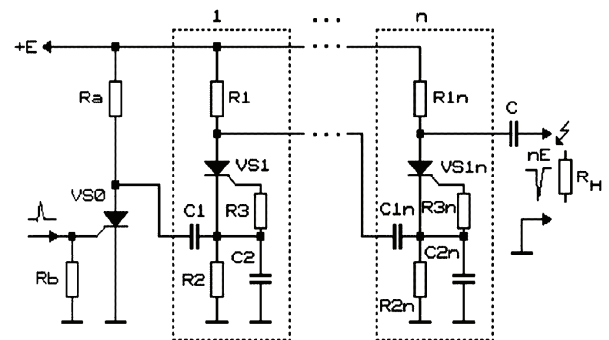


Рисунок 1 – Схема імпульсного джерела напруги Аркадьєва – Маркса на напівпровідникових елементах

Типова форма напруги на виході даного джерела імпульсної напруги показана на рис. 2.

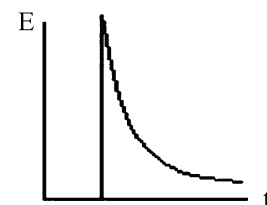


Рисунок 2 – Форма напруги на виході імпульсного джерела напруги Аркадьєва - Маркса на напівпровідникових елементах

Трансформатор Тесла представлений на рис. 3 [13, 20]. Пристрій для отримання високої напруги складається з джерела живлення E і трансформатора T_1 , накопичувального конденсатора C_1 , порогового комутуючого елемента K_1 (може бути, як іскровий розрядник, так і його напівпровідниковий аналог) і підвищує високочастотного високовольтного трансформатора T_2 . Первинна обмотка L_1 трансформатора T_2 , що представляє собою систему двох індуктивно зв'язаних контурів, в момент спрацювання комутуючого елемента виявляється короткочасно підключеною до накопичувального конденсатору C_1 . Навантаженням T_2 служить ємність C_2 , яка підключається до вторинної обмотки L_2 . Форма вихідної напруги, отримана в результаті моделювання на Electronic Workbench, показана на рис. 4.

Генерування високої напруги на навантаженні відбувається оптимальним чином, якщо власні частоти пов'язаних контурів рівні, а, отже, $L_1 C_1 = L_2 C_2$. На-

пруга на C_2 в цьому випадку до спрацьовування ключа K_1 і при відсутності втрат являє собою різницю двох гармонійних коливань [21]

$$U_2 = \frac{U_1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \left\{ \cos\left[\omega_0 / \sqrt{1-k}\right]t\right\} - \cos\left[\omega_0 / \sqrt{1+k}\right]t\right\},$$

де $\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C_1} = 1/\sqrt{L_2 C_2}$ – власна частота коливань контурів; $k = M / \sqrt{L_1 L_2}$ – коефіцієнт зв'язку контурів, обумовлений загальним магнітним потоком обмоток.

Повна передача енергії з C_1 (накопичувальної ємності в C_2 відбувається при дискретних значеннях коефіцієнта зв'язку:

$$k = \left(\left[m / (m-1) \right]^2 - 1 \right) / \left(\left[m / (m-1) \right]^2 + 1 \right),$$

де m – порядковий номер сплеску для $U_2(t)$, ($m = 1, 2, 3, \dots$).

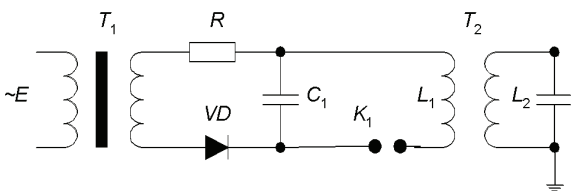


Рисунок 3 – Схема джерела на трансформаторі Тесла

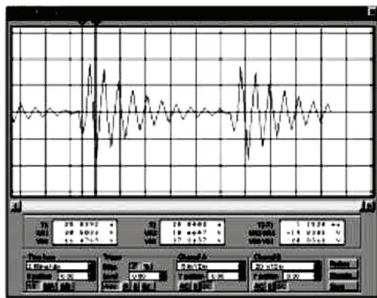


Рисунок 4 – Форма напруги на виході джерела на трансформаторі Тесла

Трансформатори Тесла дуже зручні, компактні і широко використовуються в високовольтній техніці, дозволяючи отримувати коефіцієнти трансформації від 1 до 1000 при одному або декількох витках в первинній обмотці, а вихідні напруги – близько 1 МВ і більше. Крім того, імпульсні трансформатори володіють високим ККД.

Резонансне трансформаторне джерело напруги. Коли напруга на навантаженні перевищує 100 кВ, бажано застосовувати схемні рішення, що забезпечують на виході трансформатора напруги, менші, ніж на навантаженні. Одним з варіантів таких рішень є резонансний трансформаторний джерело напруги [20]. Принципова і еквівалентна схема такого джерела, а також характерного вигляду напруги (биття) на найбільш високовольтній ємності представлені на рис. 5.

Обов'язковою умовою множення напруги на навантаженні Z_H в порівнянні з напругою на високовольтній обмотці ІТ є перевищення ємності проміжного ємнісного накопичувача C_1 над високовольтній вихідній ємністю C_2 .

Принцип дії резонансного джерела напруги поля-

гає в наступному. Попередньо заряджений до напруги U_0 первинний накопичувач C_0 після спрацьовування комутатора K , яким може бути потужний високовольтний транзистор, тиристор або іскровий розрядник, розряджається на первинну обмотку трансформатора ІТ. При цьому у вторинній обмотці ІТ, що навантажена ємністю (в даному варіанті C_1), формується напруга у вигляді різниці гармонійних коливань. Аналогічно протікає процес трансформації і в трансформаторі Тесла. Потім, на відміну від варіанту з трансформатором Тесла, спрацьовує загострюючий комутатор K_1 (може й не бути) і в додатковому контурі $L_2 C_2$ порушуються биття зі сплесками, амплітуди яких наростають в першому напівперіоді биття і спадають в другому.

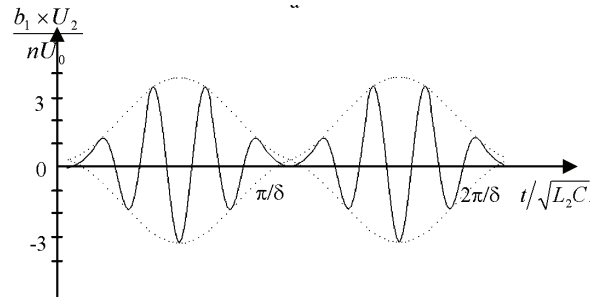
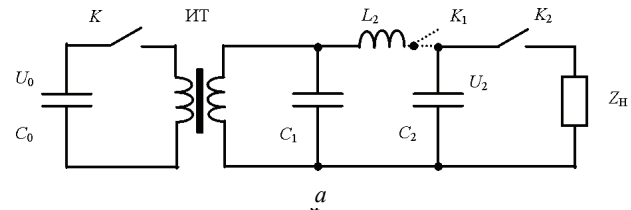


Рисунок 5 – Схеми і характерне напруга на високовольтній ємності резонансного трансформаторного джерела напруги: а – принципова схема; б – характерна напруга на ємності C_2 без спрацьовування ключа K_2

Залежно від настройки на відповідному сплеску спрацьовує ключ K_2 (іскровий розрядник), що перемикає запасену в ємності C_2 і C_1 енергію в навантаження Z_H , на якому ця енергія і виділяється.

Резонансне джерело напруги, незважаючи на наявність в ньому додаткового контуру, має менший обсяг, ніж джерело напруги на імпульсному трансформаторі з безпосередньо підключеним навантаженням – трансформаторі Тесла. Ця різниця в обсягах тим помітніше, чим менше ємність навантаження і вище напруга на C_2 .

Генератори Д'Арсонваля включають до складу низькочастотний підвищувальний трансформатор, з підключеним комутатором паралельно підвищувальній обмотці трансформатора (див. рис. 6). Паралельно комутатору F у вторинному ланцюзі підключено послідовно ланцюг, що складається з послідовного з'єднання конденсаторів C , що накопичують енергію, і первинної обмотки підвищувального трансформатора L (високо частотного автотрансформатора). Після спрацьовування комутатора F накопичувачі C розряджаються на первинну обмотку L підвищувального трансформатора. Форма напруги на виході цього при-

строю показана на рис. 7. Граничні параметри по напрузі 100 кВ, струм 10^{-3} А, частота проходження вихідних імпульсів 15-500 кГц.

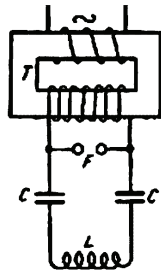


Рисунок 6 – Схема генератора Д'Арсонваля

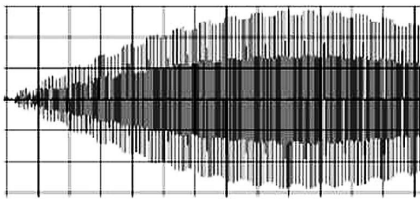


Рисунок 7 – Форма напруги на виході генератора Д'Арсонваля

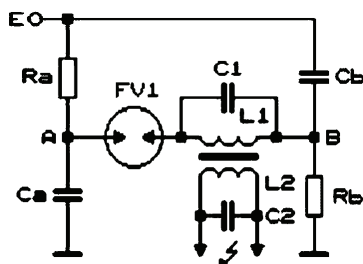


Рисунок 8 – Мостова схема отримання високої напруги

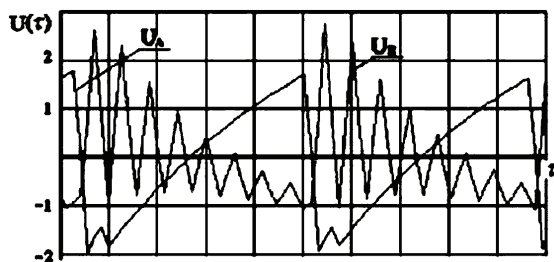


Рисунок 9 – Форма напруги мостової схеми отримання високої напруги

Мостові пристрої отримання високої напруги (рис. 8) до складу яких входить джерело напруги E , несиметрична резистивно-конденсаторна мостова схема і підвищувальний трансформатор з навантаженням. Діагональ складається з послідовно включеного комутатора FV_1 і обмотки підвищувального трансформатора L_1 . На конденсаторах, з запасється енергією, цього пристрою відбувається більш плавне наростання напруги. Граничні значення по напрузі десятки кіловольт, по току одиниці ампер, частота до ста кілогерц. Форма напруги на виході пристрою показана на рис. 9.

Пристрій з множенням напруги в первинному ланцюзі (див. рис. 10) включає в себе резистивно-емнісний ланцюг задаючих час елементів ($R_1, C_1, C_2,$

C_3, VD_1 або R_2) і комутуючого елемента FV_1 (іскрового розрядника), вихідний трансформатор L_1, L_2 і навантаження C_4 . Після спрацьовування комутатора FV_1 до обмотці L_1 високочастотного трансформатора прикладається подвоєне (потроєне) напруга. Форма вихідної напруги показана на рис. 11. Граничні значення по напрузі десятки кіловольт, по току одиниці ампер, частота до 100 кГц.

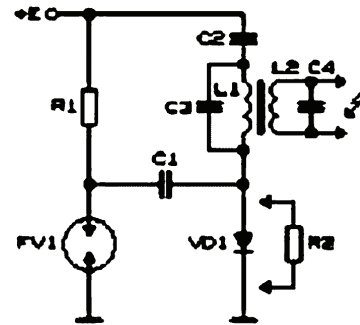


Рисунок 10 – Схема з множенням напруги в первинному ланцюзі

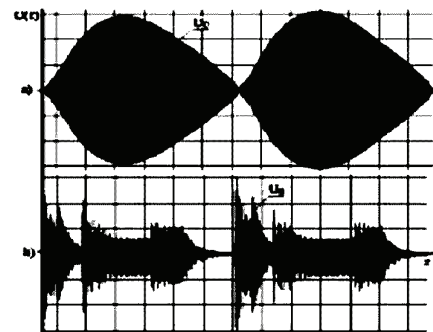


Рисунок 11 – Форма вихідної напруги схеми з множенням напруги в первинному ланцюзі

Джерела напруги, що використовують в якості накопичувача енергії індуктивні накопичувачі. Принцип роботи цього пристрою наступний. В результаті переривання протікає через індуктивність струму, при збереженій в індуктивності енергії, відбувається зміна напруги на висновках індуктивного накопичувача. Однак, у зв'язку з технічними труднощами (низькі частоти управління індуктивністю, підвищені вимоги до ізоляції індуктивності і т.д.) такі пристрої реалізуються рідко.

Пристрій з індуктивними накопичувачами $L_1 - L_6$ з використанням вибухають провідників $R_1 - R_3$ і комутаторами $FV_1 - FV_3$ наведено на рис. 12. Такі пристрої на індуктивностях можуть бути виконані за аналогією з пристроями на комутованих конденсаторах з урахуванням індивідуальних особливостей роботи індуктивностей L як накопичувачів енергії. Форма вихідної напруги має вигляд представлений на рис. 2. Граничні параметри по напрузі до 2000 кВ, струму 200 А.

Пристрій для отримання високої напруги (див. рис. 13) містить котушку індуктивності в якості накопичувача енергії для отримання напруги складається з джерела напруги U , струмообмежувального резистора R послідовно включеного з котушкою і комутуючого

елемента K_1K_2 . Форма його вихідної напруги показана на рис. 14.

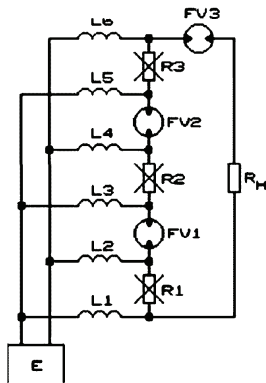


Рисунок 12 – Схема джерела високої напруги на індуктивних накопичувачах з використанням вибухають провідників

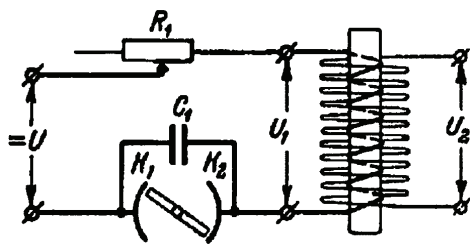


Рисунок 13 – Схема отримання високої напруги з котушкою індуктивності в якості накопичувача енергії

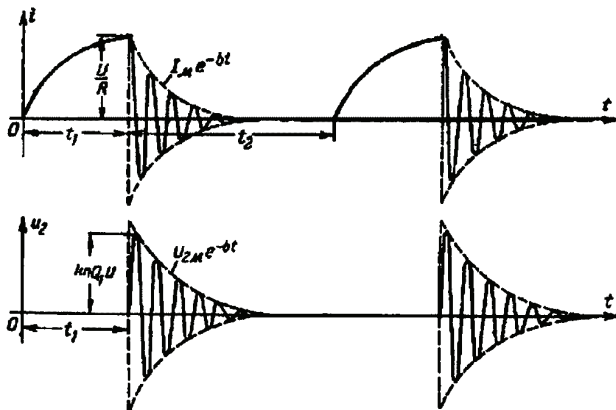


Рисунок 14 – Форма вихідного струму і напруги на котушці індуктивності

Накопичувачем може виступати або котушка індуктивності (індуктор) або первинна обмотка трансформатора (або автотрансформатор) паралельно з яким може включатися ємність або діод для обмеження коливального процесу. Управлінням замиканням і розмиканням комутатора (напівпровідникового чи іншого комутуючого елемента) на виході пристрою формується імпульси напруги, які затухають в часі.

Такі пристрої дозволяють отримувати високу напругу на виході при низькому (десятки вольт) напругі на вході.

Пристрій, що показано на рис. 15, складається з n -відривків коаксіальних кабелів, з'єднаних на вході своїми кінцями паралельно, а на виході - послідовно [13] являє собою імпульсний трансформатор з відривків коаксіальних високовольтних кабелів однакової

довжини. Якщо подати на таке пристрою імпульс напруги амплітудою U від джерела E_z , то на навантаженні Z_n вхідний імпульс трансформується в імпульс з амплітудою nU , де n – число відривків коаксіального кабелю імпульсного трансформатора. Форма імпульсу напруги має вигляд, що показано на рис. 2.

Пристрої для отримання високої напруги з індуктивно-ємнісним комбінованим способом отримання високої напруги.

У пристрою ударного збудження періодично джерело напруги E через комутатор під'єднується до коливального контуру, що складається з накопичувача C і первинної обмотки трансформатора T . Зарядний струм накопичувача C регулюється резистором R . При цьому на виході пристрою формуються затухаючі імпульси з високочастотним заповненням, що визначаються властивостями резонансного контуру. За допомогою такого пристрою можна отримувати імпульси амплітудою напруги десятки кіловольт, струму одиниць ампер і частоту імпульсу до 10000 кГц.

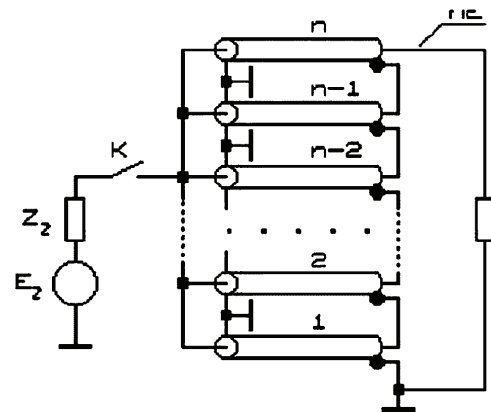


Рисунок 15 – Схема отримання високої напруги за допомогою відривків коаксіальних кабелів

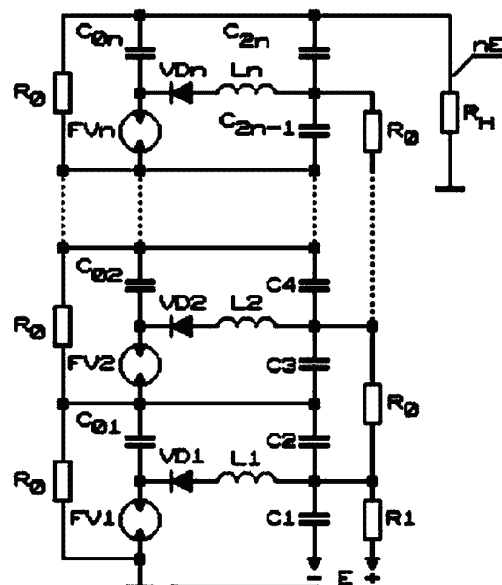


Рисунок 16 – Схема генератора Аркадієва - Маркса с індуктивно-ємнісним накопичувачем

Як пристрій (див. рис. 16) з індуктивно-ємнісним накопичувачем можна використовувати генератор

Аркадьєва - Маркса, якщо для підвищення напруги використовувати закони перехідних процесів в LC контурах для перезарядки, попередньо заряджених через резистор R , накопичувальних ємностей C через індуктивність L . Після спрацювання розрядних комутаторів FV здійснюється підсумовування напруг на виході пристрою. Форма напруги на виході пристрою має вигляд що показано на рис. 2.

Висновки. По кожному з порушених у пропонованій роботі аспектів генерації потужних високовольтних імпульсів до теперішнього часу опубліковано безліч інших неказаних статей і монографій. З різних причин неможливо охопити в даній статті хоча б більшу їх частину. Багато робіт мають закритий характер. Все ж представляється можливим зробити загальний висновок, що до сих пір широко використовуються лише традиційні побудови генеруючих пристроїв, незважаючи на підвищення вимог до їх параметрами, але при цьому зростають масштаби їх використання і, відповідно, вартість. Тому слід очікувати значного розширення наукового пошуку принципово нових видів генераторів потужних періодичних імпульсів, як з ємнісним, так і особливо з індуктивним нагромадженням енергії.

Список літератури:

1. *Каштанов В.В.* Генерация мощных электрических импульсов / *В.В. Каштанов, А.В. Сапрыгин* // Теоретическая физика. – 2007. – № 8. – С.188-200.
2. *Каштанов В.В.* Возможности снижения массы и габаритов мощных микро-миллисекундных импульсных модуляторов / *В.В. Каштанов, А.В. Сапрыгин* // Вопросы прикладной физики. – 1997. – Т. 3. – С. 75-78.
3. *Gamp A. / A. Gamp* // Particle Accelerator Conference (PAC-97), Vancouver, Canada. – 1997. – Режим доступу: <http://www.triumf.ca/pac97/papers/index.html>
4. *Шустов М.А.* Электроразрядная фотография / *М.А. Шустов, Е.Т. Протасевич.* – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 1999. – 244 с.
5. *Шустов М.А.* Теория и практика газоразрядной фотографии / *М.А. Шустов, Е.Т. Протасевич.* – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2001. – 252 с.
6. *Шустов М.А.* Практическая схемотехника. Преобразователи напряжения. Кн.3. / *М.А. Шустов.* – М.: Altex, 2002. – 190 с.
7. *Bouwers Dr.A.* Elekfrische Hichsfspannungen / *Dr.A. Bouwers.* – Berlin: Verlag von Julius Springer, 1939. – 334 p.
8. *Воробьев А.А.* Техника высоких напряжений / *А.А. Воробьев.* – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1945. – 520 с.
9. *Воробьев А.А.* Высоковольтное испытательное оборудование и измерения / *А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, Н.И. Воробьев, А.Ф. Калганов* и др. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 584 с.
10. *Фрюнгель Ф.* Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов / *Ф. Фрюнгель.* – М.-Л.: Энергия, 1965. – 488 с.
11. *Криштафович И.А.* Транзисторные системы высоковольтного электропитания / *И.А. Криштафович.* – К.: Препринт, 1988. – 55 с. (Институт электродинамики АН УССР, № 584).
12. Патент Швейцария. МКИ H02M 7/04. Бестрансформаторная схема источника питания. – №658960. Опубл. 15.12.1986.
13. *Кремнев В.В.* Методы умножения и трансформации

импульсов в силовоточной электронике / *В.В. Кремнев, Г.А. Месяц.* – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 1987. – 226 с.

14. *Месяц Г.А.* Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения / *Г.А. Месяц, А.С. Насибов, В.В. Кремнев.* – М.: Энергия, 1970. – 152 с.
 15. *Велихов Е.П.* Физика и техника мощных импульсных систем / *Е.П. Велихов.* – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
 16. *Ситайлов Г.А.* Генераторы ударной мощности / *Г.А. Ситайлов, К.А. Хорьков.* – М.: Энергия, 1979. – 127 с.
 17. *Смирнов С.М.* Генераторы импульсов высокого напряжения / *С.М. Смирнов, П.В. Терентьев.* – М.-Л.: Энергия, 1964. – 239 с.
 18. *Носов Г.В.* Разработка и численный анализ импульсных генераторов с периодически изменяющейся индуктивностью. Дисс. на соиск. уч. степ... канд. физ.-мат. наук. – Томск. политехн. ин-т, 1985. – 150 с.
 19. *Борискин А.С.* Высоковольтный источник напряжения на базе магнитокумулятивного генератора типа ВМГ-80 / *А.С. Борискин, Е.М. Димант, В.Д. Селемир, А.А. Соловьев* // Электричество. – 2001. – № 3. – С. 8-15.
 20. *Желтов К.А.* Пикосекундные силовоточные электронные ускорители / *К.А. Желтов.* – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 120 с.
 21. *Абрамян Е.А.* Интенсивные электронные пучки. Физика, техника, применение / *Е.А. Абрамян, Б.А. Альтеркоп, Г.Д. Кулешов.* – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 232 с.
- References (transliterated)**
1. *Kashtanov V.V., Saprygin A.V.* Generacija moshhnyh jelektricheskikh impul'sov [Generation of powerful electric pulses]. *Teoreticheskaja fizika*. 2007. No 8. PP.188-200.
 2. *Kashtanov V.V., Saprygin A.V.* Vozmozhnosti snizhenija massy i gabaritov moshhnyh mikro-milisekundnyh impul'snyh moduljatorov [Possibilities to reduce the mass and dimensions of powerful micro]. *Voprosy prikladnoj fiziki*. 1997. Vol. 3. PP. 75-78.
 3. *Gamp A.* Particle Accelerator Conference (PAC-97), Vancouver, Canada. 1997. <http://www.triumf.ca/pac97/papers/index.html>
 3. *Gamp A., Schiitt P., Weiland T., Fuhai Lu* Feasibility Study of a HOM IOT for TESLA. *Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference (PAC-97)*, Vancouver, Canada. 1997. PP. 3162-3168 <http://www.triumf.ca/pac97/papers/index.html>
 4. *Shustov M.A., Protasevich E.T.* Jelektrorazriadnaja fotografija [Electric discharge photography]. *Tomsk: Izd-vo Tomsk. politehn. un-ta*, 1999. 244 p.
 5. *Shustov M.A., Protasevich E.T.* Teorija i praktika gazorazriadnoj fotografii [Theory and practice of gas-discharge photography]. *Tomsk: Izd-vo Tomsk. politehn. un-ta*, 2001. 252 p.
 6. *Shustov M.A.* Prakticheskaja shemotehnika. Preobrazovateli naprjazhenija. Kn. 3. [Practical circuitry. Voltage converters. Vol. 3]. *Moscow: Altex*, 2002. 190 p.
 7. *Bouwers Dr.A.* Elekfrische Hichsfspannungen. *Berlin: Verlag von Julius Springer*, 1939. 334 p.
 8. *Vorob'ev A.A.* Tehnika vysokih naprjazhenij [Technique of high stresses]. *Moscow-Leningrad: Gosjenergoizdat*, 1945. 520 p.
 9. *Vorob'ev A.A., Vorob'ev G.A., Vorob'ev N.I., Kalganov A.F.* and others. Vysokovol'tnoe ispytatel'noe oborudovanie i izmerenija [High voltage test equipment and measurements]. *Moscow-Leningrad: Gosjenergoizdat*, 1960. 584 p.
 10. *Frjungeľ F.* Impul'snaja tehnika. Generirovanie i primenenie razrjadov kondensatorov [Impulse Technology. Generation and application of discharges of capacitors]. *Moscow-Leningrad: Jenergija*, 1965. 488 p.
 11. *Krishtafovich I.A.* Tranzistornye sistemy vysokovol't-

nogo jelektropitanija [Transistor systems of high-voltage power supply]. Kiev: Preprint, 1988. 55 p. (Institut jelektrodinamiki AN USSR, No 584).

12. Patent Shvejcarija. MKI H02M 7/04. Bestransformatornaja shema istochnika pitanija. [Transformerless power supply circuit]. No 658960. Opubl. 15.12.1986.

13. Kremnev V.V., Mesjac G.A. Metody umnozhenija i transformacii impul'sov v sil'notochnoj jelektronike [Methods of multiplication and transformation of pulses in high-current electronics]. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-e, 1987. 226 p.

14. Mesjac G.A., Nasibov A.S., Kremnev V.V. Formirovanie nanosekundnyh impul'sov vysokogo naprjazhenija [Formation of nanosecond high-voltage pulses]. Moscow: Jenergija. 1970. 152 p.

15. Velihov E.P. Fizika i tehnika moshhnyh impul'snyh sistem [Physics and technology of powerful impulse systems]. Moscow: Jenergoatomizdat, 1987. 352 p.

16. Sipajlov G.A., Hor'kov K.A. Generatory udarnojo moshhnosti [Shock power generators]. Moscow: Jenergija, 1979. 127 p.

17. Smirnov S.M., Terent'ev P.V. Generatory impul'sov

vysokogo naprjazhenija [High voltage pulse generators]. Moscow-Leningrad: Jenergija, 1964. – 239 s.

18. Nosov G.V. Razrabotka i chislennyj analiz impul'snyh generatorov s periodicheski izmenjajushhejsja induktivnost'ju. [Development and numerical analysis of pulse generators with periodically varying inductance] Diss. na soisk. uch. step... kand. fiziko-mat. nauk. – Tomsk: Tomsk. politehn. in-t, 1985. 150 p.

19. Boriskin A.S., Dimant E.M., Selemir V.D., Solov'ev A.A. Vysokovol'tnyj istochnik naprjazhenija na baze magnitokumuljativnogo generatora tipa VMG-80 [High voltage voltage source based on a magnetocumulative generator of the VMG-80]. Jelektrichestvo. 2001. No 3. PP. 8-15.

20. Zheltov K.A. Pikosekundnye sil'notochnye jelektronnye uskoriteli [Picosecond high-current electron accelerators]. Moscow: Jenergoatomizdat, 1991. 120 p.

21. Abramjan E.A., Al'terkop B.A., Kuleshov G.D. Intensivnye jelektronnye puchki. Fizika, tehnika, primenenie [Intensive electron beams. Physics, technology, application]. Moscow: Jenergoatomizdat, 1984. 232 p.

Надійшла (received) 05.02.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Пристрої для отримання імпульсів високої напруги в електротехнології / Л.В. Ваврів, В.М. Іванов, В.С. Марценюк, Р.С. Мірзоєв // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 23-30. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0740.

Устройства для получения импульсов высокого напряжения в электротехнологиях / Л.В. Ваврив, В. М. Иванов, В.Е. Марценюк, Р.С. Мерзоев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 23-30. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0740.

Devices for obtaining high voltage pulses in electrotechnologies / L.V.Vavriv, V. M. Ivanov, V.E.Martsenyuk, R.S. Merzoev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 23-30. – Bibliogr.: 21. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ваврів Людмила Владиславівна, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-63-09; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Ваврив Людмила Владиславівна, кандидат фізико-математических наук, старший научный сотрудник НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707 63 09; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Vavriv Ludmila Vladislavovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of the Research Institute of Lightning, NTU "KhPI"; tel: (057) 707 63 09; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Іванов Володимир Михайлович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-61-83; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Іванов Владимир Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-61-83; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Ivanov Vladimir Mikhailovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of RDI "Molniya" NTU "KhPI"; tel.: (057) 707-61-83; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Марценюк Валентина Євгенівна, ст. викладач кафедри ІЕФ НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707 60 52; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Марценюк Валентина Евгеньевна, ст. преподаватель кафедры ИЭФ НТУ "ХПИ", г. Харьков; тел.: (057) 707-60-52; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Martsenyuk Valentina Evgenievna, senior lecturer of the department of IEF NTU "KPI"; Tel.: (057) 707 60 52; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Мірзоєв Рустам Сідікович, студент кафедри ІЕФ НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-60-52; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Мирзоев Рустам Сидикович, студент кафедры ИЭФ НТУ «ХПИ»; тел.: (057) 707 60 52; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Mirzoev Rustam Sidikovich, student of the department IEF of NTU "KPI"; tel.: (057) 707 60 52; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

УДК 621.319.4

В.И. ГУНЬКО, А.Я. ДМИТРИШИН, С.О. ТОПОРОВ**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБИНИРОВАННОГО ПЛЕНОЧНОГО ДИЭЛЕКТРИКА НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ И ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТНОЙ ПЛЕНОК**

Розглянуто результати досліджень електрофізичних характеристик різних конструкцій комбінованого поліпропіленово-поліетилентерефталатного діелектрика для високовольтних імпульсних конденсаторів. На основі проведених експериментів на макетах секцій конденсатора проаналізовані фактори, що впливають на електричний опір ізоляції та короточасну електричну міцність.

Ключові слова: плівковий діелектрик, полярність діелектрика, електричний опір ізоляції, електрична міцність, високовольтний імпульсний конденсатор.

Рассмотрены результаты исследований электрофизических характеристик различных конструкций комбинированного полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектрика для высоковольтных импульсных конденсаторов. На основе проведенных экспериментов на макетах секций конденсатора проанализированы факторы, влияющие на электрическое сопротивление изоляции и кратковременную электрическую прочность таких диэлектрических структур.

Ключевые слова: пленочный диэлектрик, полярность диэлектрика, электрическое сопротивление изоляции, электрическая прочность, высоковольтный импульсный конденсатор.

Results of researches of the electrical characteristics of various designs combined polypropylene (PP) – polyethylene terephthalate (PET) dielectric for high-voltage pulse capacitors are reviewed. On the basis of experiments on mockups of the capacitor sections are analyzed factors, such as the polarity of the capacitor plates and films, affecting the electrical insulation resistance and short-term dielectric strength of such dielectric structures. Recommendations about using dielectric structures as capacitor insulation are given. It is found that with an increase of the polar component in the dielectric film structure electric insulation resistance decreases. The greatest electrical resistance of insulation has dielectrics structure PP + PP + PET, and the magnitude of the electrical insulation resistance is greatest when the PP film is located at the electrode positive polarity. The highest dielectric strength has the structure of PET + PET + PP, and the value of dielectric strength is greatest when the electrode of positive polarity is on the PET film.

Keywords: film dielectric, dielectric polarity, electrical insulation resistance, dielectric strength, high-voltage pulse capacitor.

Введение. В последние годы стала актуальной тенденция усовершенствования высоковольтных импульсных конденсаторов путем применения в их конструкциях в качестве рабочего диэлектрика различных вариантов исполнения чисто пленочной изоляции [1]. В работах [2, 3] приведены характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов на основе полиетилентерефталатного диэлектрика, а в [4] – на основе полипропиленового и комбинированного полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектриков.

В результате проведенных в ИИПТ НАН Украины исследований получено, что наиболее перспективным для применения в конструкциях высоковольтных импульсных конденсаторов для электроимпульсных установок различного технологического назначения является комбинированный полипропиленово-полиэтилентерефталатный диэлектрик [5-7].

Исследования по применению в различных конструкциях высоковольтных импульсных конденсаторов пленочных диэлектриков в основном были направлены на изучение их электрической прочности, прогнозирование их долговечности и оценку возможности унификации применяемых конструкций диэлектриков [4, 6-9]. Вместе с тем, определенный интерес представляет и оценка влияния на электрофизические характеристики пленочного диэлектрика соотношения полярной и неполярной составляющих в структуре пленочного диэлектрика и полярности прилегающих к ним обкладок секции.

Цель данной работы – оценить влияние расположения полярной и неполярной составляющих в комбинированном пленочном диэлектрике высоковольтного импульсного конденсатора на его электрофизические характеристики.

Основная часть. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований электрического сопротивления изоляции $R_{из}$ и электрической прочности $U_{пр}$ ряда структур пленочного диэлектрика на основе неполярной полипропиленовой (ПП) и полярной полиэтилентерефталатной (ПЭТ) пленок при различном их процентном содержании в диэлектрике – x пленки ПЭТ и $(1-x)$ пленки ПП.

Исследования проводились на макетах секций высоковольтного импульсного конденсатора с трехслойным комбинированным полипропиленово-полиэтилентерефталатным диэлектриком, применяемым в конструкциях высоковольтных импульсных конденсаторов ИИПТ НАН Украины [4-6].

Исследовались две структуры комбинированного пленочного диэлектрика – с преобладанием неполярной и с преобладанием полярной составляющей.

Структур с преобладанием неполярной составляющей было выбрано четыре варианта:

– толщиной 30 мкм, состоящий из двух слоев полипропиленовой пленки толщиной 10 мкм, разделенных одним слоем полиэтилентерефталатной пленки толщиной 10 мкм с 33,3 % содержания полярной составляющей;

– толщиной 34 мкм, состоящий из двух слоев полипропиленовой пленки толщиной 12 мкм, разделенных одним слоем полиэтилентерефталатной пленки толщиной 10 мкм с 29,4 % содержания полярной составляющей;

– толщиной 35 мкм, состоящий из двух слоев полипропиленовой пленки толщиной 10 мкм, разделенных одним слоем полиэтилентерефталатной пленки толщиной 15 мкм с 42,9 % содержания полярной составляющей;

– толщиной 39 мкм, состоящий из двух слоев полипропиленовой пленки толщиной 12 мкм, разделенных одним слоем полиэтилентерефталатной пленки толщиной 15 мкм с 38,5 % содержанием полярной составляющей.

Структур с преобладанием полярной составляющей было выбрано четыре варианта:

– толщиной 30 мкм, состоящий из двух слоев полиэтилентерефталатной пленки толщиной 10 мкм, разделенных одним слоем полипропиленовой пленки толщиной 10 мкм с 66,7 % содержания полярной составляющей;

– толщиной 32 мкм, состоящий из двух слоев полиэтилентерефталатной пленки толщиной 10 мкм, разделенных одним слоем полипропиленовой пленки толщиной 12 мкм с 62,5 % содержания полярной составляющей;

– толщиной 35 мкм, состоящий из двух слоев по-

лиэтилтерефталатной пленки толщиной 10 и 15 мкм, разделенных одним слоем полипропиленовой пленки толщиной 10 мкм с 71,4 % содержания полярной составляющей;

– толщиной 40 мкм, состоящий из двух слоев полиэтилтерефталатной пленки толщиной 15 мкм, разделенных одним слоем полипропиленовой пленки толщиной 10 мкм с 62,5% содержания полярной составляющей.

$R_{из}$ и $U_{пр}$ определялись при различной полярности обкладок макетов секций. Согласно ГОСТ 6433.3-71 каждое измерение электрической прочности проводилось на пяти образцах.

Исследование характеристик пленочных диэлектриков проводилось в отсутствие прослоек пропитывающей жидкости, являющейся в электрическом отношении наиболее слабым компонентом диэлектрической системы, а для устранения воздушных прослоек между слоями пленок, коэффициент запрессовки диэлектрика макетов секций обеспечивался равным единице.

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 1-3. Для диэлектриков структур ПП+ПЭТ+ПП и ПЭТ+ПП+ПЭТ исследования по определению влияния полярности обкладок на электрическое сопротивление изоляции и электрическую прочность не проводилось по причине их симметричности.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований структур пленочного диэлектрика типа ПП+ПЭТ+ПП и ПЭТ+ПП+ПЭТ

Структура диэлектрика	d_n , мкм	$\epsilon_{эkv}$	$tg\delta_{эkv} \times 10^{-4}$	x , %	$R_{из}$, МОм	$U_{пр}$, кВ	$U_{пр ср}$, кВ	$E_{пр ср}$, кВ/мм	σ , кВ
ПП+ПЭТ+ПП	30	2,46	9,163	33,3	12500	13,5; 16,0; 18,0; 18,0; 18,0	16,7	556,7	1,78
ПП+ПЭТ+ПП	34	2,42	8,235	29,4	13750	20,0; 19,5; 19,0; 20,0; 20,5	19,8	582,4	0,51
ПП+ПЭТ+ПП	35	2,54	11,5	42,9	10750	20,5; 21,0; 18,0; 21,0; 19,0	19,9	568,6	1,2
ПП+ПЭТ+ПП	39	2,50	10,42	38,5	12000	24,0; 23,5; 20,0; 24,0; 21,0	22,5	576,9	1,67
ПЭТ+ПП+ПЭТ	30	2,78	18,21	66,7	10000	18,0; 17,0; 16,5; 16,0; 17,0	16,9	563,3	0,66
ПЭТ+ПП+ПЭТ	32	2,73	16,95	62,5	10250	19,5; 20,5; 18,0; 19,0; 18,0	19,0	593,8	0,95
ПЭТ+ПП+ПЭТ	35	2,83	19,7	71,4	9000	19,0; 20,0; 21,0; 20,0; 20,0	20,0	571,4	0,63
ПЭТ+ПП+ПЭТ	40	2,87	20,86	75,0	8000	23,0; 22,0; 23,0; 22,0; 24,0	22,8	570,0	0,75

Примечание. σ – среднеквадратичное отклонение.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований структур пленочного диэлектрика типа ПП+ПП+ПЭТ

d_n , мкм	Положительная обкладка на пленке ПП						Отрицательная обкладка на пленке ПП								
	$R_{из}$, МОм	$U_{пр}$, кВ				$U_{пр ср}$, кВ	$E_{пр ср}$, кВ/мм	σ , кВ	$R_{из}$, МОм	$U_{пр}$, кВ				$U_{пр ср}$, кВ	$E_{пр ср}$, кВ/мм
30	17500	18,0; 13,0; 15,0; 15,0; 15,0	15,2	506,7	1,6	16750	18,0; 13,0; 13,0; 18,0; 15,0	15,4	513,3	2,24					
34	18000	17,0; 18,5; 17,0; 17,5; 19,5	17,9	526,5	0,97	17375	18,0; 19,0; 19,8; 17,5; 17,5	18,6	545,9	0,8					
35	16000	19,5; 18,0; 18,5; 19,0; 18,0	18,6	531,4	0,58	14750	21,0; 20,0; 19,0; 20,5; 19,5	20,0	571,4	0,71					
39	16750	23,0; 20,0; 20,0; 25,0; 22,0	22,0	564,1	1,9	15500	24,0; 25,0; 24,0; 22,0; 23,0	23,6	605,1	1,02					

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований структур пленочного диэлектрика типа ПЭТ+ПЭТ+ПП

d_n , мкм	Положительная обкладка на пленке ПЭТ						Отрицательная обкладка на пленке ПЭТ								
	$R_{из}$, МОм	$U_{пр}$, кВ				$U_{пр ср}$, кВ	$E_{пр ср}$, кВ/мм	σ , кВ	$R_{из}$, МОм	$U_{пр}$, кВ				$U_{пр ср}$, кВ	$E_{пр ср}$, кВ/мм
30	9800	17,5; 18,5; 18,0; 19,0; 18,0	18,2	606,7	0,51	10000	18,0; 18,0; 18,5; 17,5; 17,0	17,8	593,3	0,51					
32	10000	21,0; 18,0; 20,0; 20,5; 19,0	19,5	609,4	0,89	11000	20,0; 20,0; 19,0; 18,0; 19,0	19,2	600,0	0,75					
35	9250	20,0; 21,5; 19,0; 20,0; 22,0	20,5	585,7	0,89	9500	20,0; 20,0; 18,0; 21,0; 21,0	20,0	571,4	1,1					
40	9500	24,0; 24,0; 22,0; 22,0; 24,0	23,2	580,0	0,98	9750	22,0; 23,0; 20,0; 23,0; 20,0	21,6	540,0	1,36					

Анализируя результаты экспериментальных исследований структур пленочного диэлектрика с раз-

личными толщинами d_n , приведенные в табл. 1, видно, что пленочные диэлектрики типа ПП+ПЭТ+ПП, по

сравнению с диэлектриками ПЭТ+ПП+ПЭТ, обладают меньшими значениями относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{экр}}$, эквивалентного тангенса угла потерь $\text{tg}\delta_{\text{экр}}$, но большими значениями электрического сопротивления изоляции, что объясняется преобладающим содержанием неполярной составляющей в этих диэлектриках.

При этом как в структуре ПП+ПЭТ+ПП, так и в структуре ПЭТ+ПП+ПЭТ наибольшие значения электрического сопротивления изоляции 13750 МОм и 10250 МОм соответственно имели место в диэлектриках с наименьшим содержанием полярной составляющей, необходимо отметить, что именно эти диэлектрики обладают и наибольшей электрической прочностью 582,4 кВ/мм и 593,8 кВ/мм соответственно среди диэлектриков своего типа.

Вместе с тем, диэлектрики типа ПЭТ+ПП+ПЭТ имея, по сравнению с диэлектриками типа ПП+ПЭТ+ПП, меньшие значения электрического сопротивления изоляции, имеют несколько большие значения электрической прочности и меньшие среднеквадратичные отклонения по значениям электрической прочности. Возможным объяснением этого факта является то, что возле обкладок макетов секций, т.е. в зоне наиболее сильного разрушения диэлектрика под действием электрического поля, по причине перераспределения средней напряженности электрического поля по компонентам диэлектрика в зависимости от их относительных диэлектрических проницаемостей, расположены области с пониженной напряженностью электрического поля [10].

Результаты экспериментальных исследований пленочных структур типа ПП+ПП+ПЭТ, приведенные в табл. 2, показывают, что именно эти структуры имеют наибольшее значение электрического сопротивления изоляции. Особенно эта разница заметна, когда неполярные пленки ПП расположены у обкладки имеющей положительный потенциал, но одновременно эта структура имеет и наименьшую электрическую прочность. При изменении полярности обкладок макетов секций, т.е. когда положительный потенциал был у обкладки прилегающей к полярной пленке ПЭТ, наблюдалось снижение электрического сопротивления изоляции у всех комбинаций диэлектрических пленок, но при этом возрастала их электрическая прочность. Сравняя диэлектрики структуры ПП+ПП+ПЭТ с диэлектриками структуры ПП+ПЭТ+ПП, которые имеют те же самые соотношения полярной и неполярной составляющих, видно, что сохраняется тенденция снижения величины электрического сопротивления изоляции при увеличении в структуре диэлектрика полярной составляющей, однако, более высокой электрической прочностью обладают уже диэлектрики, имеющие большее содержание полярной составляющей при любой полярности прилегающей к ней обкладки.

Анализ результатов экспериментальных исследований, приведенных в табл. 3, показывает, что структуры пленочного диэлектрика типа ПЭТ+ПЭТ+ПП обладают наименьшим электрическим сопротивлением изоляции и наибольшей электрической прочно-

стью. Сравняя данные табл. 3 с данными табл. 2 видно, что наибольшая электрическая прочность диэлектрика достигается при расположении пленки ПЭТ у обкладки положительной полярности и, в отличие от структуры ПП+ПП+ПЭТ, в структуре ПЭТ+ПЭТ+ПП наибольшая электрическая прочность диэлектрика достигается в диэлектриках с меньшим содержанием полярной составляющей.

Выводы

1. С увеличением в структуре пленочного диэлектрика полярной составляющей электрическое сопротивление изоляции снижается.

2. Наибольшим электрическим сопротивлением изоляции обладают диэлектрики структуры ПП+ПП+ПЭТ, причем величина электрического сопротивления изоляции имеет наибольшее значение когда пленка ПП расположена у обкладки положительной полярности.

3. Наибольшей электрической прочностью обладают диэлектрики структуры ПЭТ+ПЭТ+ПП, причем величина электрической прочности диэлектриков имеет наибольшее значение когда обкладка положительной полярности находится на пленке ПЭТ.

Список литературы:

1. Рудаков В.В. Стан та тенденції розвитку високовольтних імпульсних конденсаторів / В.В. Рудаков // Вісник НТУ «ХП». – 2009. – №39. – С. 146-154.
2. Ермилов И.В. Высоковольтные импульсные конденсаторы с полимерной изоляцией / И.В. Ермилов // Электричество. – 2006. – №9. – С. 73-79.
3. Рудаков В.В. Удельная энергия высоковольтных импульсных конденсаторов с лавсановым диэлектриком / В.В. Рудаков, В.П. Касаткин // Вісник НТУ «ХП» Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. – 2012. – № 21. – С. 233-237.
4. Гунько В.И. Исследования по созданию гаммы высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком / В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, И.А. Перекупка, Т.А. Фецул // Материалы XV Международной школы-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». – Николаев, 2011. – С. 201-204.
5. Гунько В.И. Разработка высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком / В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, С.О. Топоров, И.А. Перекупка // Вісник НТУ «ХП» Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. – 2012. – № 52. – С. 65-71.
6. Онищенко Л.И. Создание серии высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком на базе одного изоляционного корпуса / Л.И. Онищенко, В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, И.А. Перекупка // Материалы XVI Международной школы-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». – Николаев, 2013. – С. 200-203.
7. Гунько В.И. Создание высоковольтных импульсных конденсаторов на основе комбинированного пленочного диэлектрика / В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, И.А. Перекупка, С.О. Топоров // Электротехника и электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 53-55.
8. Рудаков В.В. / В.В. Рудаков, В.П. Кравченко, О.Ю. Дубийчук // Вісник НТУ «ХП» Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. – 2012. – № 52. – С. 154-160.
9. Дмитришин А.Я. Оценка длительной электрической прочности различных конструкций пленочного диэлектрика

для высоковольтных импульсных конденсаторов / А.Я. Дмитришин, И.Ю. Гребенников, С.О. Топоров, Е.Н. Слепец // Электронная обработка материалов. – 2014. – № 5. – С. 92-94.

10. Кучинский Г.С. Силовые электрические конденсаторы / Г.С. Кучинский, Н.И. Назаров. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 310 с.

References (transliterated):

1. Rudakov V.V. Stan ta tendentsiyi rozvytku vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatoriv [Status and tendencies of development of high-voltage pulse capacitors]. Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2009, no. 39, pp. 146–154.

2. Ermilov I.V. Vysokovol'tnye impul'snye kondensatory s polimernoj izoljaciej [High-voltage pulse capacitors with polymeric insulation]. Elektrichestvo [Electricity], 2006, no. 9, pp. 73-79.

3. Rudakov V.V., Kasatkin V.P. Udel'naja jenergija vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov s lavsanovym dijelektrikom [The specific energy of high-voltage pulse capacitors with Mylar dielectric]. Visnyk NTU "KhPI" Tem. vyp.: Tekhnika i elektrofizyka vysokokh naprug. [Bulletin of the NTU "KhPI" Special Issue: Technique and Electrophysics of High Voltage]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2012, no. 21, pp. 233-237.

4. Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ja., Onishhenko L.I., Perekupka I.A., Feshhuk T.A. Issledovaniya po sozdaniyu gammy vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov s plenochnym dijelektrikom [Research on the development range high-voltage pulse capacitor with film dielectric]. Materialy XV Mezhdunarodnoj shkoly-seminara "Fizika impul'snykh razrjadov v kondensirovannykh sredah" [Proc. of the XV Int. Conf. "Physics of Pulse Discharges in Condensed Media"]. Nikolaev, 2011, pp. 201-204.

5. Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ja., Onishhenko L.I., Toporov S.O., Perekupka I.A. Razrabotka vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov s plenochnym dijelektrikom [Development of high-voltage pulse capacitors with film dielectric]. Visnyk NTU "KhPI" Tem. vyp.: Tekhnika i elektrofizyka vysokokh naprug. [Bulletin of the National Technical University "KhPI" Special

Issue: Technique and Electrophysics of High Voltage]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2012, no. 52, pp. 65-71.

6. Onishhenko L.I., Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ja., Perekupka I.A. Sozdanie serii vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov s plenochnym dijelektrikom na baze odnogo izoljacionnogo korpusa [Creation of series of high-voltage pulse capacitors with film dielectric on base of the one insulation case]. Materialy XV Mezhdunarodnoj shkoly-seminara "Fizika impul'snykh razrjadov v kondensirovannykh sredah" [Proc. of the XVI Int. Conf. "Physics of Pulse Discharges in Condensed Media"]. Nikolaev, 2013, pp. 200-203.

7. Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ja., Onishhenko L.I., Perekupka I.A., Toporov S.O. Sozdanie vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov na osnove kombinirovannogo plenochnogo dijelektrika [Design of high-voltage pulse capacitors on the basis of the combined film dielectric]. Elektrotehnika i elektromekhanika [Electrical engineering and Electromechanics], 2014, no. 4, pp. 53-55.

8. Rudakov V.V., Kravchenko V.P., Dubijchuk O.Ju. Vysokovol'tnyj impul'snyj kondensator s ogranichenym resursom [The high-voltage pulse capacitor with a limited resource]. Visnyk NTU "KhPI" Tem. vyp.: Tekhnika i elektrofizyka vysokokh naprug. [Bulletin of the National Technical University "KhPI" Special Issue: Technique and Electrophysics of High Voltage]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2012, no. 52, pp. 154-160.

9. Dmitrishin A.Ja., Grebennikov I.Ju., Toporov S.O., Slepets E.N. Ocenka dlitel'noj jelektricheskoj prochnosti razlichnykh konstrukcij plenochnogo dijelektrika dlja vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov [Estimation of long-term dielectric strength of different constructions of film dielectric for high-voltage pulse capacitors]. Elektronnaja obrabotka materialov [Surface Engineering and Applied Electrochemistry], 2014. no. 5, pp. 92-94.

10. Kuchinskij G.S., Nazarov N.I. Silovye elektricheskie kondensatory [Electric Power Capacitors]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1992. 310 p.

Поступила (received) 20.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Електрофізичні характеристики комбінованого плівкового діелектрика на основі поліпропіленової та поліетилентерефталатної плівки / В. І. Гунько, О. Я. Дмитришин, С. О. Топоров // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 31-34. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Электрофизические характеристики комбинированного пленочного диэлектрика на основе полипропиленовой и полиэтилентерефталатной пленок / В. И. Гунько, А. Я. Дмитришин, С. О. Топоров // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 31-34. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Electrophysical characteristics of the combined film dielectric based on polypropylene and polyethylene terephthalate films / V. I. Gun'ko, A. Ya. Dmitrishin, S. O. Toporov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 31-34. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гунько Віктор Іванович – зав. сектором, ІПТ НАН України, м. Миколаїв; тел.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Гунько Виктор Иванович – зав. сектором, ИИПТ НАН Украины, г. Николаев; тел.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Gun'ko Viktor Ivanovych – Head of Sector, IPPT NAS of Ukraine, Mykolaiv; tel.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Дмитришин Олексій Ярославович – молодший науковий співробітник, ІПТ НАН України, м. Миколаїв; тел.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Дмитришин Алексей Ярославович – младший научный сотрудник, ИИПТ НАН Украины, г. Николаев; тел.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Dmitrishin Aleksey Yaroslavovych – Junior Research Assistant, IPPT NAS of Ukraine, Mykolaiv; tel.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Топоров Сергій Олегович – провідний інженер, ІПТ НАН України, м. Миколаїв; тел.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Топоров Сергей Олегович – ведущий инженер, ИИПТ НАН Украины, г. Николаев; тел.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Toporov Sergey Olegovych – Lead Engineer, IPPT NAS of Ukraine, Mykolaiv; tel.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

УДК 537.528:622.236

Т.Д. ДЕНИСЮК, А.Н. РАЧКОВ

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗРУШЕНИЯ

Запропоновані шляхи розширення можливостей електророзрядного руйнування неметалевих матеріалів. Наведені відомості, які підтверджують підвищення ефективності руйнування міцних неметалевих матеріалів природного та штучного походження при використанні технології високовольтного електрохімічного вибуху з керованим виділенням енергії. Створена технологія та обладнання для її здійснення може бути задіяна для руйнування бетонних фундаментів, залізобетонних споруд, валунів, міцних ґрунтів та ін. в промисловому, дорожньому, житловому, гідротехнічному будівництві та ін.

Ключові слова: руйнування, міцні неметалеві матеріали, електророзрядна технологія, екзотермічні суміші, високовольтний електрохімічний вибух.

Предложены пути расширения возможностей электроразрядного разрушения неметаллических материалов. Приведены данные, подтверждающие повышение эффективности разрушения прочных неметаллических материалов природного и искусственного происхождения при применении технологии высоковольтного электрохимического взрыва с управляемым выделением энергии. Разработанная технология и оборудование для ее осуществления могут быть использованы для разрушения бетонных фундаментов, железобетонных изделий, валунов, прочных грунтов и др. в промышленном, дорожном, жилищном, гидротехническом строительстве и др.

Ключевые слова: разрушение, прочные неметаллические материалы, электроразрядная технология, экзотермические смеси, высоковольтный электрохимический взрыв.

The ways of empowering an electric failure of non-metallic materials. The data confirming the efficiency of destruction of strong non-metallic materials of natural and artificial origin in the application of high voltage electrochemical technology explosion with a controlled release of energy. The developed technology and equipment for its implementation can be used for the destruction of concrete foundations, concrete products, boulders, and other solid soil. Industrial, road, housing, hydraulic engineering, and others.

Keywords: destruction, durable non-metallic materials, electric discharge technology, exothermic mixture, a high electrochemical explosion.

Введение. В поисках высокопроизводительных и малоэнергозатратных технологий разрушения прочных неметаллических материалов разработано немало методов и способов. Одним из самых энергоэффективных способов разрушения является взрыв, т.е. взрывное преобразование энергии и высокая эффективность ее воздействия. Однако такой метод не везде можно применять, например, вблизи сооружений, действующих предприятий, в местах прокладки кабелей, линий электро- и теплопередач, магистральных трубопроводов, в курортных зонах и зонах повышенной оползневой опасности. Минимально допустимая величина безопасного расстояния, например, при взрыве 4 кг взрывчатого вещества (ВВ), должна быть не менее 100 м [1].

Взрывное преобразование наблюдается и при высоковольтном электроразряде в жидкости, использование которого имеет преимущества сравнительно с взрывом [2].

При взрыве величина выделившейся энергии зависит от величины заряда ВВ, а при высоковольтном электроразряде – от объема накопителей, которые имеют низкую энергоемкость соответствующую 0,1 Дж/см³ [3]. Для достижения при высоковольтном электроразряде высокой энергоемкости требуются большие габариты набора конденсаторных батарей, что значительно снижает надежность и мобильность оборудования.

Преимущество же высоковольтного электроразряда в жидкости состоит в присущем этому процессу

гибком, динамичном, программном управлении характеристиками путем параметрического изменения элементов разрядной цепи или использование многоконтурных генераторов импульсных токов (ГИТ) [4].

Кроме этого процесс разрушения с использованием высоковольтного электроразряда в жидкости не вызывает сейсмических возмущений, исключает разлет осколков, не выделяет в атмосферу вредных веществ, создает возможности производства направленного откола фрагментов и может использоваться для реконструкции действующих объектов или вблизи жилых помещений и геотехнических сооружений [5].

Механизм импульсного электроразрядного воздействия на разрушаемый объект характеризуется высоким давлением волн сжатия, генерируемых электроразрядом. Давление волн сжатия зависит от параметров генератора импульсов тока и на основании эмпирической зависимости [6] выражается формулой:

$$P = \frac{U^{5/4} \cdot C^{1/4}}{R^{1/2} \cdot L^{3/8} \cdot l^{5/8}}, \quad (1)$$

где U – напряжение, кВ; C – емкость разрядного контура, мкФ; R – расстояние до разрушаемого объекта, м; L – индуктивность разрядного контура, мкГн; l – длина разрядного промежутка, м.

Максимальный эффект разрушения, исходя из соотношения (1), достигается при максимальном давлении в импульсе волн сжатия, т.е. при максимальных значениях напряжения и емкости разрядного контура и минимальных значениях индуктивности. Увеличение запасенной энергии разряда за счет значительного

повышения напряжения ведет к дополнительным трудностям по обеспечению управляемости процессом, техники безопасности и надежности работы оборудования, а при увеличении емкости растут габариты оборудования, снижается его мобильность [7]. Таким образом, эффективность электроразрядного разрушения неметаллических материалов может быть повышена за счет создания условий в разрядном промежутке, обеспечивающих максимальное выделение энергии в разрядном контуре.

Цель работы – исследование повышения эффективности электроразрядного разрушения прочных неметаллических материалов за счет использования комбинированного способа увеличения энергии.

Основная часть. При использовании электроразрядов для разрушения крупногабаритных объектов как, например, бетонных фундаментов, железобетонных изделий, валунов, прочных морских донных грунтов и др. требуются энергии разряда на порядок выше, чем при дроблении и измельчении материалов, и ее потери становятся еще значительнее. Поэтому для создания экономичных и конкурентоспособных технологий электроразрядного разрушения неметаллических материалов необходима разработка новых технологических принципов такой обработки. В основу разработки техпроцесса электроразрядного разрушения положены принципы управляемого электровзрыва с различными комбинированными энергоисточниками, в т.ч. экзотермическими смесями (ЭС). Такой комбинированный способ увеличения энергии назван высоковольтным электрохимическим взрывом (ВЭХВ) [8].

ВЭХВ – это комплекс физико-химических явлений, протекающих при наличии в зоне разрядного канала веществ или составов, способных к экзотермическим химическим превращениям в условиях развиваемых в канале высоких температур и давлений. Высвобождающаяся в результате таких превращений энергия суммируется с электрической, поступающей из емкостного накопителя ГИТ, в результате чего общее количество энергии существенно возрастает без увеличения массогабаритных размеров оборудования. Это дает возможность решить задачу проведения работ по разрушению неметаллических материалов, разработка которых электроразрядным способом малоэффективна и энергозатратна, за счет электровзрывного способа, при котором практически отсутствует выброс материала, а энергия разрушения дозируется массой ЭС, не относящимися к ВВ. Горение ЭС может происходить только при высоких температурах и давлении, которые генерируются высоковольтными электроразрядами.

В процессе лабораторных и промышленных исследований разрушения неметаллических материалов (например, высокопрочных грунтов) электроразрядом установлен радиус разрушения, связанный с энергией накопителя, глубиной рыхления и прочностью материала следующей зависимостью [9]:

$$R_p = \sqrt{B_3 \cdot \frac{W}{\sigma_{сж} \cdot h_{шт}}}, \quad (2)$$

где R_p – радиус разрушения, м; W – запасаемая энергия, Дж; $\sigma_{сж}$ – прочность материала на сжатие, Па; $h_{шт}$ – глубина шпура, м; B_3 – коэффициент эффективности электроразряда, определен экспериментально, для закрытых объемов равен 8,0.

Для электроразрядов с использованием инициируемых ЭС установлена величина суммарной энергии, зависящая от массы ЭС и удельных затрат электрической энергии, необходимых для полного сгорания ЭС [10]:

$$W_{ВЭХВ} = G \cdot w_\tau \left(1 + \frac{\mu}{w_\tau} \right), \quad (3)$$

где $W_{ВЭХВ}$ – суммарная энергии при ВЭХВ, Дж; G – масса ЭС, кг; w_τ – удельная энергия, выделившаяся в канале разряда, приходящаяся на единицу массы ЭС $\left(w_\tau = \frac{W}{G} \right)$, Дж/кг; μ – удельная электрическая эффективность ЭС при высоковольтном электрохимическом взрыве $\left(\mu = \frac{\Delta W}{G} \right)$, Дж/кг; ΔW – энергия ВЭВ ($\Delta W = W_{ВЭХВ} - W$), Дж.

Зависимость суммарной энергии ВЭХВ от массы ЭС с 60% Al и ЭС с 40% Al, полученных экспериментальным и расчетным путем, показана на рис. 1.

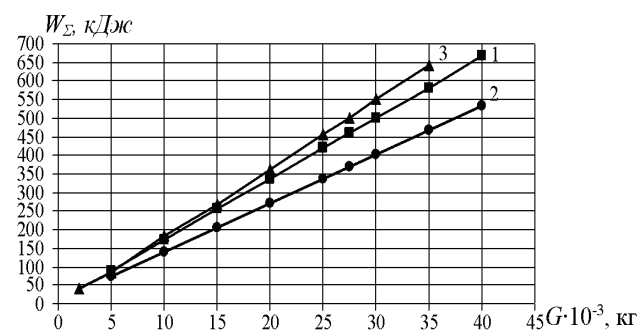


Рисунок 1 – Зависимость суммарной энергии ВЭХВ от массы ЭС: 1 – ЭС с 60% Al; 2 – ЭС с 40% Al; 3 – расчетная

Увеличение суммарной энергии потенциально открывает большие возможности по разрушению высокопрочных неметаллических материалов. Результаты расчетов энергии по формуле (3) при заданных радиусах разрушения, в зависимости от прочности материала достаточно большого диапазона, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Расчеты суммарной энергии ВЭХВ для фиксированных радиуса разрушения и прочности материала

Прочность материала на сжатие $\sigma_{сж} \cdot 10^6, \text{ Па}$	Радиус разрушения $R_p, \text{ м}$		
	0,2 м	0,25 м	0,3 м
	Суммарная энергия ВЭХВ $W_{ВЭХВ}, \text{ кДж}$		
15	30,0	58,6	101,0
20	40,0	78,0	135,0
30	60,0	117,0	202,0
40	80,0	156,0	270,0
50	100,0	195,0	337,0
60	120,0	234,0	405,0
70	140,0	273,0	472,0
80	160,0	312,0	540,0
100	200,0	391,0	675,0

Результаты численного моделирования, приведенные в табл. 1 и на рис. 1, подтверждают выдвинутую гипотезу о возможном повышении эффективности электроразрядного способа разрушения неметаллических материалов с прочностью более 20 МПа. Экспериментальная проверка эффективности использования ВЭХВ проводилась на модельных блоках прочностью 40 МПа с размерами, представленными на рис. 2.

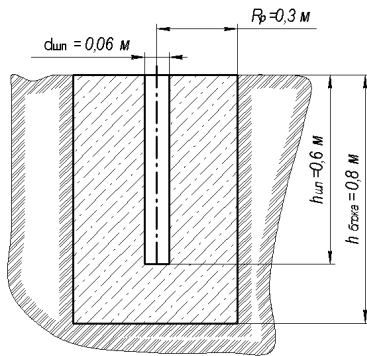


Рисунок 2 – Модельный блок

Методика проведения испытаний включает: бурение в модельных блоках шпуров небольшого диаметра, установку в шпуры электродов с капсулами, заполненными ЭС, и подачу напряжения на электроды.

Для поджига ЭС была установлена запасенная энергия накопителей 6,0 кДж. Разрушение блоков начиналось при инициировании 0,005 кг ЭС и больше. Полное разрушение модельного блока (рис. 3) произошло при сгорании ЭС в пределах от 0,02 до 0,025 кг, что соответствует суммарной энергии ВЭХВ от 300 до 400 кДж [11].

На рис. 4 представлены результаты расчетов суммарной энергии ВЭХВ по формуле (3) и экспериментальные данные для $\sigma_{сж} = 40$ МПа; $R_p = 0,3$ м; $h_{шт} = 0,6$ м.



Рисунок 3 – Разрушенный образец

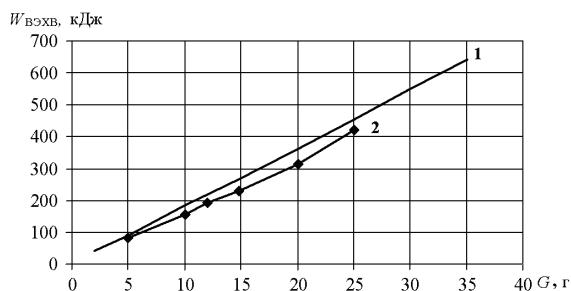


Рисунок 4 – Зависимость полной энергии ВЭХВ от массы ЭС: 1 – расчетная; 2 – эксперимент

На основе результатов экспериментальных исследований разработаны электроразрядная технология

разрушения неметаллических материалов разной прочности и структуры и опытный образец мобильного малогабаритного оборудования (рис. 5, табл. 2), использование которых обеспечит решение проблемы разупрочнения и разрушения неметаллических материалов любой прочности вблизи строений и коммуникационных устройств.



Рисунок 5 – Опытный образец установки

Таблица 2 – Основные технические характеристики оборудования [12]

Наименования параметров	Величина
Номинальная запасенная энергия, кДж, не менее	6,0
Полная мощность, кВА, не более	5
Габаритные размеры, м, не более	1,2 x 0,7 x 1,25
Длина кабеля электродной системы, м	25
Масса, кг, не более	300
Масса электродной системы, кг	21
Номинальное рабочее напряжение, В	25000
Среднее значение тока из сети, А	40
Питание установки напряжением, В	220

Кроме того, данный метод позволит получить объем разупрочнения прямков любой формы, в зависимости от схем расположения шпуров и размещения в них капсул с ЭС, значительно снизить стоимость монтажно-строительных работ и в целом капитальных вложений в промышленное, жилищное и гидротехническое строительство.

Выводы. Теоретически и экспериментально установлена принципиальная возможность использования высоковольтного электрохимического взрыва с целью повышения эффективности электроразрядного процесса деформирования и разделения прочных материалов.

Использование ВЭХВ позволяет значительно уменьшить габариты оборудования и повысить его мобильность, снизить затраты на его транспортирование и обслуживание по сравнению с существующими отечественными и зарубежными модификациями электроразрядного оборудования для разрушения неметаллических материалов природного и искусственного происхождения.

Процесс разрушения с использованием ВЭХВ не вызывает сейсмических возмущений, исключает разлет осколков, не выделяет в атмосферу вредных веществ, создает возможность производства направленного откола фрагментов.

Полученные результаты направлены на создание новых электроразрядных технологий и оборудования

для разрушения неметаллических материалов различной структуры и прочности, которые могут применяться:

– для разрушения прочных грунтов, в т.ч. локального разупрочнения, при проведении земляных работ в промышленном, дорожном, гидротехническом строительстве, при проведении дноуглубительных работ и др.;

– для разрушения природных и искусственных негабаритов, скальных пород высокой прочности;

– для разрушения бетонных и железобетонных конструкций и фундаментов при проведении реконструкции производственных и жилищных сооружений, строительных работ нулевого цикла и т.д. в том числе в условиях действующего производства.

Список литературы:

1. Кушнарев Д.М. Взрывные работы в гидромелиоративном и сельском строительстве / Д.М. Кушнарев, М.П. Беликов. – М.: Издательство литературы по строительству, 1972. – 223 с.
2. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий / Г.А. Гулый. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с.
3. Вовк И.Т. Тенденции развития силового высоковольтного оборудования для электрогидроимпульсных технологий / И.Т. Вовк, А.И. Вовк, Л.Н. Мирошниченко // Техническая электродинамика. – 2002. – № 2. – С. 63-65.
4. Наугольных К.А. Электрические разряды в воде / К.А. Наугольных, Н.А. Рой. – М.: Наука, 1971. – 155 с.
5. Ризун А.Р. Сейсмически безопасные расстояния при рыхлении донных грунтов высоковольтным электрохимическим взрывом / А.Р. Ризун, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк // Электронная обработка материалов. – 2008. – № 3. – С. 89-91.
6. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости / Е.В. Кривицкий. – К.: Наукова думка, 1984. – 204 с.
7. Малюшевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии / П.П. Малюшевский. – К.: Наукова думка, 1983. – 272 с.
8. Вовченко А.И. Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах / А.И. Вовченко, А.А. Посохов. – К.: Наукова думка, 1992. – 168 с.
9. Ризун А.Р. Разработка и внедрение технологического процесса электроразрядного разрушения прочных донных грунтов / А.Р. Ризун, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк, В.А. Поздеев // Наука та інновації. – 2007. – № 3. – С. 50-55.
10. Ризун А.Р. Иницирование электроразряда экзотермическими составами при разрушении прочных донных грунтов / А.Р. Ризун, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк // Электронная обработка материалов. – 2007. – № 2. – С. 49-51.
11. Пат. України № 104678, МПК (2006.01) E21

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Можливості підвищення ефективності електророзрядних технологій руйнування / Т.Д. Денисюк, О.М. Рачков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 35-39. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Возможности повышения эффективности электроразрядных технологий разрушения / Т.Д. Денисюк, А.Н. Рачков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 35-39. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

The possibilities of increasing the efficiency of electrical discharge technologies of destruction / T.D. Denisyuk, A.N. Rashkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 35-39. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Денисюк Тетяна Дмитрівна – молодший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв; тел. (0512) 58-71-21; e-mail: dpcd.ipt@com.ua.

C37/18. Спосіб знеміцнення міцних ґрунтів високовольтним електрохімічним вибухом / А.Р. Ризун, О.І. Вовченко, Ю.В. Голень, О.Д. Блащенко, О.М. Рачков, В.Ю. Кононов. – № a201214038; заявл. 10.12.2012; опубл. 25.02.2014. Бюл.№ 4. <http://www.uipv.org>.

12. Ризун А.Р. Технологічний процес та обладнання для електророзрядного локального знеміцнення ґрунтів різної міцності і структури // А.Р. Ризун, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк // Наука та інновації. – 2014. – № 5. – С. 18-23.

Bibliography (transliterated):

1. Kushnarev D.M., Belikov M.P. Blasting operations in the irrigation and drainage and rural construction. Moscow: Publishing House Building, 1972. 223 p.

2. Guly G.A. Scientific basis of the discharge-pulse technology. Kyiv: Naukova Dumka, 1990. 208 p.

3. Vovk I.T., Vovk A.I., Miroshnichenko L.N. Trends in the development of high-voltage power equipment electrohydro-pulse Technology. Technical electrodynamics. 2002. No 2. PP. 63-65.

4. Naugolnykh K.A., Roy N.A. Electrical discharges in water. Moscow: Nauka, 1971. 155 p.

5. Rizun A.R., Holen Y.V., Denisyuk T.D. Seismic safety distance for loosening bottom soils high voltage electrochemical explosion. Electronic processing of materials. 2008. No 3. PP. 89-91.

6. Krivitsky E.V. Dynamics of electric explosion in a liquid. – Kyiv: Naukova Dumka, 1984. 204 p.

7. Malyshevsky P.P. Basics of Running-pulse technology. Kyiv: Naukova Dumka, 1983. 272 p.

8. Vovchenko A.I., Posohov A.A. Managed electroexplosive energy conversion processes in condensed matter. Kyiv: Naukova Dumka, 1992. 168 p.

9. Rizun A.R., Holen Y.V., Denisyuk T.D., Pozdееv V.A. Development and implementation of the process of destruction of an electric solid bottom soils. Science that innovatsii. 2007. No 3. PP. 50-55.

10. Rizun A.R., Holen Y.V., Denisyuk T.D. Initiation of electric discharge exothermic compositions in the destruction of strong bottom soils. Electronic processing of materials. 2007. No 2. PP. 49-51.

11. Pat. Ukraine № 104678, IPC (2006.01) E21 C37 / 18. The method of softening hard soils high-voltage electrochemical explosion. Rizun A.R., Vovchenko A.I., Holen Y.V., Blaschenko O.D., Rachkov A.N., Kononov V.Y. № a201214038; appl. 10.12.2012; publ. 02/25/2014. Byul.№ 4. <http://www.uipv.org>.

12. Rizun A.R., Holen Y.V., Denisyuk T.D. The process and equipment for electrodischarge local softening soils of different strength and structure. Science and Innovation. 2014. No 5. PP. 18-23.

Поступила (received) 23.03.2017

Денисюк Татьяна Дмитриевна – младший научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины, г. Николаев; тел. (0512) 58-71-21; e-mail: dpcd.iipt@com.ua.

Denisyuk Tatiana – Junior Researcher at the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Nikolaev; tel. (0512) 58-71-21; e-mail: dpcd.iipt@com.ua.

Рачков Олексій Миколайович – молодший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв; тел. (0512) 58-71-21; e-mail: dpcd.iipt@com.ua.

Рачков Алексей Николаевич – младший научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины, г. Николаев; тел. (0512) 58-71-21; e-mail: dpcd.iipt@com.ua

Rashkov Alexey – Junior Researcher at the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Nikolaev; tel. (0512) 58-71-21; e-mail: dpcd.iipt@com.ua.

УДК 551.594:62:781

А.В. ЖУРАХІВСЬКИЙ, Т.В. БІНКЕВИЧ, І.В. ЛІЩАК

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ НА ОЦІНКУ НАДІЙНОСТІ ГРОЗОЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАННЯ

Розглянуто та обґрунтовано необхідність врахування метеорологічних умов при оцінці надійності грозозахисту повітряних ліній електропередачі. Проведено аналіз існуючих методик врахування метеорологічних умов із зазначенням основних недоліків та суперечностей існуючих досліджень. Наведено метод врахування метеорологічних умов із використанням поправочних коефіцієнтів, а також визначено числові характеристики метеорологічних умов та виразів для їх визначення. Проведено розрахунки числових характеристик метеорологічних умов в залежності і з зміною висоти розташування.

Ключові слова: лінія електропередачі, надійність грозозахисту, метеорологічні умови, випадкові фактори, ймовірність пробоя ізоляції.

Рассмотрена и обоснована необходимость учета метеорологических условий при оценке надежности грозозащиты воздушных линий электропередачи. Проведен анализ существующих методик учета метеорологических условий с указанием основных недостатков и противоречий существующих исследований. Приведен метод учета метеорологических условий с использованием поправочных коэффициентов, а также определены числовые характеристики метеорологических условий и выражений для их вычисления. Проведены расчеты числовых характеристик метеорологических условий в зависимости с изменением высоты расположения.

Ключевые слова: линия электропередачи, надежность грозозащиты, метеорологические условия, случайные факторы, вероятность пробоя изоляции.

In the article it was researched the necessity to take into account meteorological conditions when assessing there liability of lightning protection of overhead transmission lines that were considered and justified. The analysis of existing metrological methods was carried out, indicating the main shortcomings and contradictions of existing studies. It was proposed the method for recording meteorological conditions using correction factors, and it was determined numerical characteristics of meteorological conditions and expressions for their calculation. It was described the calculations of the numerical characteristics of meteorological conditions are carried out, depending on the change in altitude.

Keywords: transmission line, reliability of lightning protection, meteorological conditions, random factors, the probability of insulation breakdown.

Вступ. Надійність об'єктів електроенергетичних систем, в тому числі і повітряних ліній електропередачі (ЛЕП), безпосередньо залежить від кліматичних навантажень. При проектуванні ЛЕП вибір її конструкції (тип опор, марка дроту, довжина прольоту тощо), у великій мірі визначається кліматичними навантаженнями.

Від величини прийнятих розрахункових кліматичних навантажень залежить аварійність та експлуатаційна надійність ЛЕП. Неврахування кліматичних навантажень під час проектування може призводити до аварійних ситуацій на ЛЕП і, як наслідок, до перерви в електропостачанні споживачів.

В даний час нормативні кліматичні навантаження

визначаються на підставі кліматичних характеристик, отриманих за регіональними картами кліматичного районування або за даними спостережень метеостанцій [9,10].

Кліматичні навантаження пов'язані з атмосферними процесами. Тимчасова розбіжність випадків перевищення заданих кліматичних навантажень на різних ділянках ЛЕП обумовлено проходженням атмосферних процесів і утворенням зон одночасного перевищення заданого навантаження для даної території. Розміри зони залежать від характеру та масштабів атмосферних процесів і від фізико-географічних і синоптичних умов.

Основна частина. Грозові розряди впливають на об'єкти електричних систем за певного (в даний момент) стану атмосфери та ізоляції. Стан атмосфери характеризується певними метеорологічними умовами – тиском, температурою, вологістю повітря, а також силою вітру, наявністю або відсутністю дощу тощо. Стан зовнішньої ізоляції характеризується ступенем її забруднення, наявністю або відсутністю зволоження і дощу (мається на увазі, що грозові розряди виникають не тільки в момент випадання дощу, але й перед дощем за сухого стану ізоляції або в перервах між дощами). Перераховані фактори впливають на імпульсну міцність зовнішньої ізоляції ліній і апаратів, а там самим на грозостійкість різною мірою [11,13,14].

Електрична міцність гірлянд ізоляторів, введів, опорної ізоляції апаратів, які працюють на відкритому повітрі, змінюється зі зміною параметрів атмосферного повітря: атмосферного тиску p , температури t° , абсолютної вологості g . Міцність ізоляції зазвичай задається для нормальних метеорологічних умов ($p = 760$ мм рт. ст.; $t^\circ = 20^\circ\text{C}$; $g = 11$ г/м³). Для оцінки міцності ізоляції в експлуатації слід враховувати відхилення тиску, температури та вологості від своїх стандартних значень. Перерахунок напруг u_0 , які ізоляція витримує в нормальних атмосферних умовах, на напруги u , які вона може витримувати реально, відповідно до [1] здійснюється за формулою:

$$u = u_0 \cdot \frac{\delta}{k}, \quad (1)$$

де δ – відносна густина повітря, що дорівнює

$$\delta = \frac{0,386 \cdot p}{273 + t^\circ}, \quad (2)$$

k – поправочний коефіцієнт на абсолютну вологість повітря, який визначається за [1] (рис. 1).

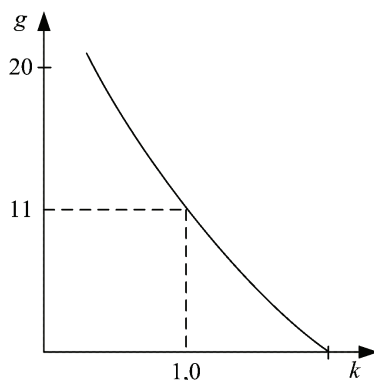


Рисунок 1 – Графік залежності $k=f(g)$ для всіх класів напруги для позитивної полярності імпульсів

Формула (1) справедлива для всіх класів напруг для імпульсів позитивної полярності, для яких здійснюється координата ізоляції. Рекомендації [1] з врахування впливу на розрядну напругу вологості повітря (коефіцієнт k) і його відносної густини δ базується на узагальненнях МЕК, отриманих в різних країнах розрядних напруг повітряних проміжків довжиною до 1 м [12]. Проведені останнім часом дослідження міцності повітряних проміжків довжиною більше 1 м виявили непридатність поправочних коефіцієнтів δ/k для

робочої напруги та імпульсів, що відповідають внутрішнім перенапругам. Помилки, викликані зведенням напруг по δ/k , настільки суттєві, що розкид розрядних напруг, вимірних для різних значень p , t , g виявляється менше розкиду отриманого після зведення всіх вимірних розрядних напруг до нормальних атмосферних умов [2, 3]. Отже введення поправок на густину й абсолютну вологість повітря не тільки не сприяє зближенню наведених розрядних напруг, але й збільшує розкид порівняно з розкидом неприведених розрядних напруг. У зв'язку з цим автори [2, 3] ґрунтуються на виявленій особливості компенсації впливу вологості зміною температури (ці величини мають досить жорстку позитивну кореляційну взаємозалежність), рекомендують розрядні напруги довгих повітряних проміжків для робочої частоти 50 Гц та імпульсах внутрішніх перенапруг, приводити тільки для зміни атмосферного тиску.

Дослідження довгих повітряних проміжків для імпульсів грозових перенапруг показали, що вплив вологості не послаблюється зі збільшенням довжини проміжків. Наведені на рис. 2 криві поправочного коефіцієнта по абсолютній вологості повітря для довгих повітряних проміжків мало відрізняються від кривих рекомендованих [1]. Тому прийняту в [1] поправку для імпульсних розрядних напруг ми можемо вважати цілком правомірною.

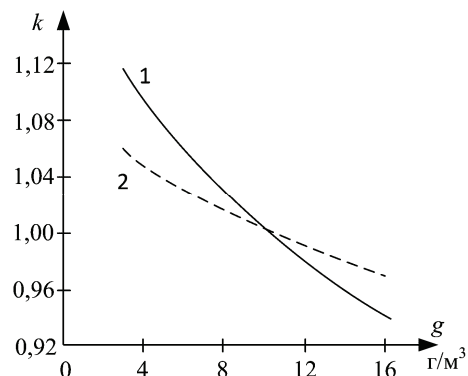


Рисунок 2 – Залежність поправочного коефіцієнта від абсолютної вологості за імпульсної напруги 1/50 мкс. для проміжку стержень – стержень довжиною 2,03 м: для позитивної полярності (1); для негативної полярності (2)

Величина δ/k є випадковою величиною, що підпорядкована нормальному закону розподілу. Числові характеристики розподілу δ/k : математичне сподівання – $M_{\frac{\delta}{k}}$ і середньоквадратичне відхилення – $\sigma_{\frac{\delta}{k}}$ можуть бути визначені на основі дослідних даних. Маючи характеристики розподілу δ/k можна оцінити вплив цієї величини на розподіл розрядних напруг ізоляції $u_{розр}$. Розрядні напруги для нормальних метеорологічних умов $u_{нр0}$, так звані зведені розрядні напруги, розподілені також за нормальним законом. Оскільки $u_{нр}$ дорівнює добутку величин $u_{нр0}$ і δ/k , то закон розподілу цієї величини також нормальний, а умовні характеристики її можна визначити з виразів [2]

$$M_{u_{np}} = M_{u_{нр0}} \cdot \frac{M_{\delta}}{k};$$

$$\sigma_{u_{np}} = \sqrt{\sigma_{u_{нр0}}^2 + \sigma_{\frac{\delta}{k}}^2}. \quad (3)$$

Розрядні напруги електроізоляційних конструкцій залежать від впливу метеорологічних умов у двох напрямках. З одного боку ці умови в певній місцевості призводять до істотних змін середньорічних розрядних напруг $M_{u_{np}}$ порівняно з середніми розрядними напругами $M_{u_{нр0}}$, отриманими для нормальних умов.

Зазначені зміни залежать в основному від висоти розташування електричної ізоляції над рівнем моря – і з зростанням висоти імпульсна міцність зменшується. З іншого боку випадкові коливання метеорологічних умов у даній місцевості $\sigma_{\frac{\delta}{k}}$ призводять до збільшення

області розкиду пробивних напруг порівняно з розкидом за постійних p, t, g . Зміна середніх розрядних напруг і розширення їх області розкиду в кінцевому результаті призводить до зміни електричних характеристик, які слід враховувати для визначення надійності грозозахисту. Для оцінки впливу на надійність грозозахисту об'єкта висоти його розташування над рівнем моря і коливання метеорологічних умов на даній висоті необхідно знати функції розподілу поправки δ/k для різних висот. В роботі [4] на основі обробки даних реєстрації протягом 30 років метеорологічних умов по 17 пунктам, розташованим в рівних кліматичних районах колишнього СРСР на різних висотах прямих ударів блискавки, отримані усереднені криві розподілу ймовірності δ/k . Однак ми не можемо скористатися зазначеними кривими, оскільки параметри повітря p, t, g в роботі [5] вимірювалися цілорічно за будь-якої погоди. У зв'язку з цим під час гроз розподіли δ/k можуть помітно відрізнятися від отриманих. В роботі [6] наведені криві середніх значень величин δ, t, g залежно від H , тобто криві M_{δ}, M_t, M_g , а також криві, що обмежують основний діапазон змін зазначених величин (80 % вимірів), що дозволяють визначити дисперсію випадкових величин $\delta, t, g - D_{\delta}, D_t, D_g$ на різних висотах.

Поправочний коефіцієнт δ/k виражається функціонально через величини відносної густини повітря δ та абсолютної вологості g , оскільки $k = \gamma(g)$. В роботі [7] наведені формули для наближеного визначення математичного сподівання й дисперсії функції двох випадкових величин. Для $z = f(x, y)$:

$$M_z = f(M_x; M_y), \quad (4)$$

$$D_z = \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_x}\right)_0^2 \cdot D_x + \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y}\right)_0^2 \cdot D_y + 2 \cdot \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_x}\right)_0 \cdot \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y}\right)_0 \cdot k_{xy}, \quad (5)$$

де k_{xy} – кореляційний момент випадкових величин x, y . Індекс "0" вказує, що часткові похідні беруться в точці $(M_x; M_y)$.

Формули (4), (5) для визначення числових характеристик випадкової величини δ/k , по числових характеристиках величин δ, g не можуть бути використані,

оскільки не відома кореляційна взаємозалежність зазначених величин. Коефіцієнти кореляції r_{tg} можна встановити на основі наявних дослідних даних [2,3] тільки для величин g і t причому не тільки для періоду гроз, а для будь-якої погоди. Тому ми можемо визначити $M_{\frac{\delta}{k}}$ і $\sigma_{\frac{\delta}{k}}$ або допускаючи некорельованість величин δ і g , або виразивши δ/k через p, t, g , враховуючи наближене значення коефіцієнта кореляції r_{tg} . Коефіцієнт кореляції, необхідний для визначення кореляційного моменту k_{tg} , за даними [2] дорівнює 0,887.

Для більшої достовірності результату ми усунули з дослідного поля значень g і t за будь-якої погоди точки, що виходять за межі g і t для періоду гроз. Ці точки встановлені за даними роботи [6].

Встановимо функціональні залежності випадкової величини δ/k від параметрів атмосферного повітря. Апроксимуємо криву поправочного коефіцієнта на вологість (рис. 1) виразом

$$k = \frac{1}{0,0075 \cdot g + 0,918}. \quad (6)$$

Для першого випадку:

$$\delta/k = \delta(0,0075 \cdot g + 0,918). \quad (7)$$

Для другого випадку:

$$\delta/k = \frac{0,386 \cdot p}{(273+t) \cdot k} = \frac{0,0029g + 0,354}{273+t} \cdot p = \gamma \cdot p. \quad (8)$$

Наведемо приклад розрахунку виконаного за формулами (4), (5) при $H = 0$ м. Під час визначення числових характеристик розподілу δ/k для першого випадку використовуємо безпосередньо формули (4), (5) отримаємо:

$$M_{\frac{\delta}{k}} = M_{\delta} \cdot (0,0075 \cdot g + 0,918) = 1,037;$$

$$D_{\frac{\delta}{k}} = \left[\frac{\sigma(\delta/k)}{\sigma\delta} \right]_0^2 \cdot D_{\delta} + \left[\frac{\sigma(\delta/k)}{\sigma g} \right]_0^2 \cdot D_g = (0,0075 \cdot g + 0,918)_0^2 \times$$

$$\times D_{\delta} + (0,0075 \cdot g)_0^2 \cdot D_g = 9,86 \cdot 10^{-4};$$

$$\sigma_{\frac{\delta}{k}} = \sqrt{D_{\frac{\delta}{k}}} = 0,0314;$$

$$\sigma_{\frac{\delta}{k}, \%} = \frac{\sigma_{\frac{\delta}{k}} \cdot 100}{M_{\frac{\delta}{k}}} = 3,03.$$

В другому випадку, враховуючи відсутність у [8] даних по тиску повітря, спочатку визначимо числові характеристики випадкової величини γ , а тоді випадкової величини p .

$$M_{\gamma} = \frac{0,0029 \cdot M_g + 0,354}{273 + M_t} = 1,35 \cdot 10^{-3};$$

$$D_{\gamma} = \left(\frac{\sigma_{\gamma}}{\sigma g}\right)_0^2 \cdot D_g + \left(\frac{\sigma_{\gamma}}{\sigma t}\right)_0^2 \cdot D_t + 2 \cdot \left(\frac{\sigma_{\gamma}}{\sigma g}\right)_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{\gamma}}{\sigma t}\right)_0 \cdot k_{tg} \times$$

$$\times \sqrt{D_g D_t} = \left(\frac{0,0029}{273+t}\right)_0^2 \cdot D_g + \left(\frac{0,0029g + 0,354}{(273+t)^2}\right)_0^2 \cdot D_t +$$

$$+ 2 \cdot \left(\frac{0,0029}{273+t}\right)_0 \cdot \left(\frac{0,0029g + 0,354}{(273+t)^2}\right)_0 \cdot k_{tg} \cdot \sqrt{D_g D_t} = 2 \cdot 10^{-10}.$$

Для формули (8) запишемо:

$$D_{\delta} = \left(\frac{\sigma \delta}{\sigma p} \right)_0^2 \cdot D_p + \left(\frac{\sigma \delta}{\sigma t} \right)_0^2 \cdot D_t.$$

Звідки отримаємо:

$$D_p = \frac{D_{\delta} - \left(\frac{\sigma \delta}{\sigma t} \right)_0^2 \cdot D_t}{\left(\frac{\sigma \delta}{\sigma p} \right)_0^2} = \frac{D_{\delta} - \left(\frac{0,386 p}{(273+t)} \right)_0^2 \cdot D_t}{\left(\frac{0,386 p}{(273+t)} \right)_0^2} = 141;$$

$$\sigma_p = \sqrt{D_p} = \sqrt{141};$$

$$M_{\delta} = \frac{0,386 \cdot M_p}{273 + M_t};$$

$$M_p = \frac{M_{\delta} \cdot (273 + M_t)}{0,386} = 770.$$

Знайдемо числові характеристики випадкової величини:

$$M_{\delta/k} = M_p \cdot M_{\gamma} = 1,039;$$

$$\sigma_{\delta/k} = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_{\gamma}^2} = 11,9;$$

$$\sigma_{\delta/k, \%} = \frac{\sigma_{\delta} \cdot 100}{M_{\delta/k}} = 3,03 = 1,9.$$

Великі розбіжності в результатах обчислень середньоквадратичного відхилення випадкової величини δ/k отримані внаслідок неврахування в першому випадку кореляційного зв'язку між випадковими величинами δ і g . Надалі розрахунки проводилися тільки для другого випадку. Результати розрахунків зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків числових характеристик випадкових величин.

H	M_t	M_g	D_t	D_g	D_{γ}	M_{γ}	$\sigma_{\gamma}, \%$	M_{δ}	M_p	D_{δ}	D_p	$\sigma_p, \%$	$\sigma_{\delta/k}, \%$	$M_{\delta/k}, \%$
0	21,5	14,5	20	8	$2 \cdot 10^{-10}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	1,1	1,01	770	$5 \cdot 10^{-4}$	141	1,55	1,9	1,037
150	21	14,1	20	9	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	1,1	0,996	760	$5 \cdot 10^{-4}$	146	1,59	1,94	1,019
500	20	13,1	20	12	$3,5 \cdot 10^{-10}$	$1,34 \cdot 10^{-3}$	1,4	0,963	731	$5 \cdot 10^{-4}$	156	1,71	2,2	0,988
1000	18	11,6	20	12,7	$4 \cdot 10^{-10}$	$1,34 \cdot 10^{-3}$	1,5	0,915	690	$4,5 \cdot 10^{-4}$	140	1,71	2,27	0,920
1500	15,5	10,2	20	10,7	$2,8 \cdot 10^{-10}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	1,3	0,868	649	$3,5 \cdot 10^{-4}$	97	1,51	2,0	0,863
2000	12,5	8,8	20	8	$2 \cdot 10^{-10}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	1,1	0,820	607	$2,8 \cdot 10^{-4}$	64	1,63	1,72	0,801

Висновки. В статті розглянуто та обґрунтовано необхідність врахування метеорологічних умов під час оцінки надійності грозозахисту повітряних ліній електропередачі. Аналізуючи існуючі методики врахування метеорологічних умов, поправочні коефіцієнти та графіки залежностей необхідно зазначити суттєві недоліки та суперечності існуючих результатів досліджень.

Наведено метод врахування метеорологічних умов із використанням поправочних коефіцієнтів, а також визначено числові характеристики метеорологічних умов та виразів для їх визначення.

Проведено розрахунки числових характеристик метеорологічних умов залежно від зміни висоти розташування ЛЕП.

Список літератури:

- ГОСТ 1516.2-97 (2003). Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции».
- Бронфман А.И. Режимы работы вентиляльных разрядников при грозовых перенапряжениях / А.И. Бронфман. – М.: Энергия, 1977
- Бронфман А.И. Статическая методика расчета надежности грозозащиты подстанций сверхвысокого напряжения / А.И. Бронфман // Известия НИИПТ. – 1970. – Сб. 16.
- Бронфман А.И. Статическая методика упрощенного расчета надежности грозозащиты подстанций 750–1200 кВ / А.И. Бронфман // Труды НИИПТ, 1972, №18
- Гири Ф.К. Определение закона распределения амплитуды и крутизны фронта тока молнии с учетом их корреляции / Ф.К. Гири, М.В. Костенко // Известия Вузов «Энергетика». – 1970. – № 3.
- Бургсдорф В.В. Грозозащита линий электропередач / В.В. Бургсдорф // Электричество. – 1969. – № 8.

7. Бургсдорф В.В. Параметры молнии и их выбор при разработке грозозащиты / В.В. Бургсдорф, С.М. Попов // Труды ВНИИЭ. – 1975. – С. 32-45.

8. Александров Г.Н. Вольт-секундные характеристики гирлянд изоляторов при нестандартных импульсах грозовых перенапряжений / Г.Н. Александров // Известия Вузов «Энергетика». – 1980. – № 3. – С. 16-12.

9. Правила улаштування електроустановок. Вид. 3, перероб. і доп. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – С. 736.

10. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів / Міністерство палива та енергетики України. – Х.: Видавництво «Форт», 2012. – 368 с.

11. Методические указания по определению климатических нагрузок на ВЛ с учетом ее длины. ОАО «ФСК ЕЭС» 2010.

12. Alec Bennett Measurement of Atmospheric Electricity During Different Meteorological Conditions / Alec Bennett // A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy Department of Meteorology. July 2007.

13. EN 50341_1: Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV [Текст]. Part 1: General requirements – Common specifications. – Brussels : CENELEC, 2009. – 234 p. – (International Standard).

14. Шилин А.Н. Расчет надежности воздушных линий электропередачи с учетом влияния погодных условий / А.Н. Шилин, О.И. Доронина // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 4. – С. 18-22.

Bibliography (transliterated):

- HOST 1516.2-97 (2003). Elektrooborudovanye y elektroustanovky peremennoho toka na napryazhenye 3 kV y vyshye. Obshchye metody uspytanyu elektrycheskoy prochnosty izolatsyyu».
- Bronfman A.Y. Rezhymy raboty ventyl'nykh razryadnykov pry hrozovykh perenapryazheniyakh. Moscow: Enerhyua, 1977.

3. Bronfman A.Y. Statycheskaya metodyka rascheta nadezhnosti hrozozashchyty podstantsyy sverkhvysokoho napryazhenyya. Yzvestyya NYYPT, sb.16, 1970.

4. Bronfman A.Y. Statycheskaya metodyka uproschennoho rascheta nadezhnosti hrozozashchyty podstantsyy 750–1200 kv. Trudy NYYPT, 1972, no. 18

5. Hyrsh F.K., Kostenko M.V. Opredelenye zakona raspredelenyya amplytudy y krutyzny fronta toka molnyy s uchetom ykh korrelyatsyy. Yzvestyya Vuzov "Enerhetyka", 1970, no. 3.

6. Burhsdorf V.V. Hrozozashchyta lynyy elektroperedach. "Elektrychestvo", 1969, no. 8.

7. Burhsdorf V.V., Popov S.M. Parametry molnyy y ykh vybor pry razrobotke hrozozashchyty. Trudy VNYE, 1975. pp. 32-45.

8. Aleksandrov H.N. Vol't-sekundnye kharakterystyky hyrlyand yzolyatorov pry nestandartnykh ymпульsakh hrozovykh perenapryazhenyy. Yzvestyya Vuzov "Enerhetyka", 1980, no. 3, pp. 16-12.

9. Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok. vyd. 3, pere-

rob. i dop. Minpalyvernerho Ukrainy, Kyiv, 2010. pp. 736.

10. Pravyla tekhnichnoyi ekspluatatsiyi elektroustanovok spozhyvachiv. Ministerstvo palyva ta enerhetyky Ukrainy, Kharkiv: Vydavnytstvo "Fort", 2012. 368 p.

11. Metodycheskye ukazanyya po opredelenyyu klymatycheskykh nahruzok na VL s uchetom ee dlyny. OAO FSK EES, 2010.

12. Alec Bennett. Measurement of Atmospheric Electricity During Different Meteorological Conditions. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy Department of Meteorology. July 2007.

13. EN 50341_1: Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV. Part 1: General requirements Common specifications. Brussels : CENELEC, 2009. 234 p. (International Standard).

14. Shylyn A.N., Doronyina O.Y. Raschet nadezhnosti vozdushnykh lynyy elektroperedachy s uchetom vlyuanyya pohodnykh uslovyy. Elektro. Elektrotekhnika, elektroenerhetyka, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. 2014. vol. 4. pp. 18-22..

Надійшла (received) 12.02.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження впливу метеорологічних умов на оцінку надійності грозозахисту повітряних ліній електропередачі / А.В. Журахівський, Т.В. Бінкевич, І.В. Ліщак // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 39-43. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

Исследование влияния метеорологических условий на оценку надежности грозозащиты воздушных линий электропередачи / А.В. Жураховский, Т.В. Бинкевич, И.В. Лищак // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 39-43. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

Research of influence of the meteorological conditions to the evaluation of there liability of lightning protection of overhead transmission lines / A.V. Zhurakhovskiy, T.V. Binkevych, I.V. Lishchak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 39-43. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Журахівський Анатолій Валентинович – доктор технічних наук, професор Національного університету «Львівська політехніка»

Жураховский Анатолий Валентинович – доктор технических наук, профессор Национального университета «Львовская политехника»

Zhurakhivskiy Anatolii Valentynovych – doctor of technical sciences, professor of Lviv Politechnic National University

Бінкевич Тарас Володимирович – аспірант, Національний університет "Львівська політехніка"; тел: (093)6974062; e-mail: 0507019417@mail.ru

Бинкевич Тарас Владимирович – аспирант, Национальный университет «Львовская политехника»; тел: (093)6974062; e-mail: 0507019417@mail.ru

Binkevych Taras Volodymyrovych – Postgraduate Student; Lviv Politechnic National University; тел: (093)6974062; e-mail: 0507019417@mail.ru

Ліщак Ігор Володимирович – провідний спеціаліст, Національний університет «Львівська політехніка»

Лищак Игорь Владимирович – ведущий специалист, Национальный университет «Львовская политехника»

Lishchak Ihor Volodymyrovych – leading specialist, Lviv Politechnic National University

УДК 621.316.9

Д. Г. КОЛИУШКО, С. С. РУДЕНКО, Г. М. КОЛИУШКО**АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЕЙСТВУЮЩИХ
ЭНЕРГООБЪЕКТОВ УКРАИНЫ**

В роботі проведено аналіз нормованих параметрів заземлювальних пристроїв (ЗП) енергооб'єктів України, що знаходяться в експлуатації. Сформовано базу даних результатів діагностики стану ЗП діючих енергооб'єктів. Отримано статистичні розподіли перевищення допустимих значень напруги дотику, напруги на ЗП та опору ЗП для підстанцій різних класів напруги. Обґрунтована необхідність виконання реконструкції ЗП у відповідності з вимогами щодо допустимого значення напруги дотику.

Ключові слова: заземлювальний пристрій, напруга дотику, опір, реконструкція, енергооб'єкт, статистичний розподіл.

В работе проведен анализ нормируемых параметров заземляющих устройств (ЗУ) энергообъектов Украины, находящихся в эксплуатации. Создана база данных результатов диагностики состояния ЗУ действующих энергообъектов. Получены статистические распределения превышения допустимых значений напряжения прикосновения, напряжения на ЗУ и сопротивления ЗУ для подстанций различных классов напряжения. Обоснована необходимость выполнения реконструкции ЗУ в соответствии с требованиями к допустимому значению напряжения прикосновения.

Ключевые слова: заземляющее устройство, напряжение прикосновения, сопротивление, реконструкция, энергообъект, статистическое распределение.

The diagnostics was performed for grounding grids more than 1 000 existing power plants. In this paper the standardized parameters grounding of the power plants, which are in operation in Ukraine, were analyzed. To solve this problem we compiled the statistical base of standardized parameters, we performed the analysis for the the statistical distributions of exceeding allowable value of the touch voltage, grounding voltage and grounding resistance for substations of different voltage classes. The necessity performing of grounding reconstruction in accordance with the requirements for allowable value of the touch voltage was substantiated.

Keywords: ground grids, voltage touch, resistance, reconstruction, power plant, statistical distribution.

Постановка проблеми и анализ нормативных документов. В настоящее время срок эксплуатации электрических подстанций Украины, в подавляющем большинстве случаев превышает 30 лет. За этот период заземляющее устройство (ЗУ) претерпевает значительные изменения, вследствие чего его нормируемые параметры могут превысить допустимые значения, а конструктивное исполнение перестает соответствовать требованиям нормативных документов. Наиболее часто встречающейся причиной нарушения целостности ЗУ становится коррозия заземлителей в процессе длительной эксплуатации, которую усугубляет высокая агрессивность грунта в месте расположения подстанции, например, вблизи или на территории промышленных объектов. Также имеют место: ошибки при монтаже ЗУ, подсоединение новых и замена старых единиц оборудования ОРУ без учета реальной схемы ЗУ, непреднамеренное нарушение целостности заземляющей сетки при земляных работах и т.д.

Текущее состояние ЗУ контролируется при помощи электромагнитной диагностики (ЭМД) [1] и на основании ее результатов разрабатываются рекомендации для проведения ремонтных работ по реконструкции и восстановлению ЗУ согласно требованиям нормативных документов [2-4].

В соответствии с ПУЭ [2] существуют два направления проектирования ЗУ для электроустановок напряжением более 1 кВ в электрических сетях с глухозаземленной нейтралью: первое – по допустимому значению напряжения прикосновения ($U_{\text{прик}}$) и второе – по допустимому значению сопротивления ЗУ ($R_{\text{ЗУ}}$).

Существует ряд общих требований к конструк-

тивному выполнению для указанных способов проектирования ЗУ: горизонтальный заземлитель (ГЗ) должен охватывать все единицы оборудования электроустановки, а продольные и поперечные ГЗ должны быть соединены в заземляющую сетку, при обеспечении как можно меньшей длины заземляющих проводников и стекании тока не менее чем в двух направлениях.

Необходимо отметить, что требования как к значениям нормируемых параметров, так и к конструктивному выполнению ЗУ при разработке рекомендаций по указанным направлениям имеют ряд существенных различий. Например, напряжение на ЗУ при проектировании по допустимому $R_{\text{ЗУ}}$ ограничивается значением 10 кВ, а также регламентируется значения самого сопротивления ЗУ (не более 0,5 Ом при удельном сопротивлении грунта не более 500 Ом·м). В то же время, при проектировании по первому направлению напряжение на ЗУ может превышать 10 кВ при соблюдении дополнительных условий, а значение $R_{\text{ЗУ}}$ вообще не регламентируется.

ЗУ, выполненное в соответствии с допустимым напряжением прикосновения, не имеет дополнительных требований к конструктивному выполнению. В [2] лишь рекомендуется размещать продольные и поперечные ГЗ с учетом допустимой величины $U_{\text{прик}}$ и удобства присоединения заземляемого оборудования. В случае же необходимости для снижения $U_{\text{прик}}$ в местах оперативного обслуживания оборудования следует обустроить изоляционный слой (например, подсыпку щебнем) толщиной 0,1-0,2 м.

В случае проектирования ЗУ в соответствии с допустимой величиной $R_{\text{ЗУ}}$ к его конструктивному

исполнению предъявляются жесткие требования. Вдоль каждой линии электрооборудования прокладываются продольные заземлители на расстоянии не более 1,5 м от оборудования, а поперечные заземлители располагают между оборудованием на фиксированном расстоянии между ними: 4,0; 5,0; 6,0; 7,5; 9,0; 11; 13,5; 16; 20 м в сторону увеличения от периферии к центру подстанции. К тому же размеры ячеек заземляющей сетки должны не превышать $6 \text{ м} \times 6 \text{ м}$ в местах присоединения нейтралей силовых трансформаторов и короткозамыкателей. Глубина прокладки ГЗ должна быть 0,5-0,7 м, в то время как при проектировании ЗУ по допустимому $U_{\text{прик}}$ она может составлять 0,3 м.

В практике эксплуатации электроустановок напряжением более 1 кВ в сетях с глухозаземленной нейтралью распространено ошибочное мнение, что если сопротивление ЗУ не превышает 0,5 Ом, то само ЗУ удовлетворяет всем требованиям по электробезопасности. При эксплуатации зачастую $U_{\text{прик}}$ не контролируется, т.к. измерение его и приведение к реальным значениям токов КЗ является трудоемкой задачей [1] и должно выполняться с особой тщательностью во избежание методических ошибок. Кроме того, не проверяется конструктивное исполнение ЗУ на соответствие требованиям нормативных документов.

В связи с необходимостью проведения ремонтно-восстановительных работ ЗУ подстанций Украины, находящихся в эксплуатации, становится актуальным вопрос выбора направления реконструкции ЗУ: по допустимому значению $U_{\text{прик}}$ или по допустимому значению $R_{\text{ЗУ}}$.

Сотрудниками НИПКИ «Молния» была выполнена ЭМД ЗУ более чем 1000 энергообъектов. Подробный анализ показал, что практически все ЗУ действующих подстанций не соответствуют нормативным требованиям к конструктивному исполнению и только наличие реальной исполнительной схемы на текущий момент и определенные на ее основании нормируемые параметры, позволяет оценивать состояние ЗУ.

Целью данной работы является определение оптимального направления реконструкции ЗУ на основании статистического анализа нормируемых параметров, полученных в ходе проведения ЭМД на действующих подстанциях Украины.

Материалы исследования. В настоящей работе на основании составленной базы данных для объектов, обследованных в период с 2001 по 2015 гг., проведен статистический анализ количества превышений допустимых значений нормируемых параметров ЗУ действующих подстанций. В качестве предельно допустимого $R_{\text{ЗУ}}$ принималось значение 0,5 Ом, напряжения на ЗУ значения 5 и 10 кВ, а допустимое $U_{\text{прик}}$ выбиралось исходя из величины времени срабатывания защиты по значениям, приведенным в [2].

В табл. 1 показан объем выборки по различным классам напряжения, которые рассматривались в работе.

Следует отметить, что подобная статистическая база данных получена впервые в мировой практике

(1004 действующих энергообъекта классами напряжения от 35 кВ до 750 кВ). Для сравнения известный анализ значений нормированных параметров ЗУ проведен швейцарской фирмой «Fachkommission für Hochspannungsfragen» базируется данных лишь 44 подстанций швейцарской федеральной железной дороги «Schweizerischen Bundesbahnen» [6].

Таблица 1 – Объем выборки по различным классам напряжения, рассмотренные в работе

Класс напряжения, кВ	110	150	220 и более
Число ОРУ станций и подстанций	346	129	110

Измерение нормируемых параметров производилось согласно методике описанной в [1-5] по принципу амперметра-вольтметра: $R_{\text{ЗУ}}$ определялось с помощью однолучевой или двухлучевой схемы, при этом вспомогательный токовый электрод располагался на расстоянии 1,5-3 D, где D – наибольшая диагональ ЗУ, а расстояние до потенциального вспомогательного электрода $(0,62 \div 1)$ от расстояния до токового электрода. Напряжение прикосновения $U_{\text{прик}}$ определялось по аналогичной схеме в нескольких контрольных точках. При этом в качестве вспомогательного потенциального электрода использовалась медная пластина, имеющая резистор с сопротивлением 1 кОм. Сам же вспомогательный потенциальный электрод располагался на расстоянии 0,8 м от исследуемой единицы оборудования. На основании полученных данных в ходе проведения ЭМД ЗУ (реального расположения ЗУ и электрофизических характеристик грунта) производились расчеты значения $U_{\text{прик}}$ для остальных единиц оборудования.

Выполнить корректное измерение $R_{\text{ЗУ}}$ и $U_{\text{прик}}$ в ряде случаев не представляется возможным, что обусловлено расположением подстанции в черте города с плотной застройкой или на территории промышленного объекта [7], а также большими размерами ЗУ [8]. Поэтому в соответствии с [1] и на основании результатов ЭМД ЗУ осуществляется расчет значений $R_{\text{ЗУ}}$ и $U_{\text{прик}}$ с использованием вспомогательных измерений, позволяющих проверить адекватность расчетной модели реальным условиям.

На рис. 1 приведено процентное превышение допустимого сопротивления ЗУ для обследованных подстанций, на которых осуществлялось измерение $R_{\text{ЗУ}}$ (объем выборки для соответствующих классов напряжения составлял: 110 кВ – 153 подстанции, 150 кВ – 50 подстанций, 220 и более кВ – 54 подстанции).

Как видно из графиков как для расчетной величины $R_{\text{ЗУ}}$, так и для измеренной наблюдается одинаковая тенденция: наиболее часто превышения наблюдаются на ЗУ энергообъектов классом напряжения 110 кВ (17,6 и 7,8 % соответственно), а самый низкий процент – для энергообъектов классом 220 и более кВ (3,6 и 1,9 % соответственно). Это объясняется тем, что сама величина $R_{\text{ЗУ}}$ в основном определяется периметром ЗУ и электрофизическими характеристиками грунта, при этом наличие ГЗ внутри контура ЗУ оказывает слабое влияние на значение $R_{\text{ЗУ}}$, а периметр ЗУ

подстанций классом напряжения 220 кВ и выше, как правило, существенно больше, чем у подстанций 110-150 кВ.

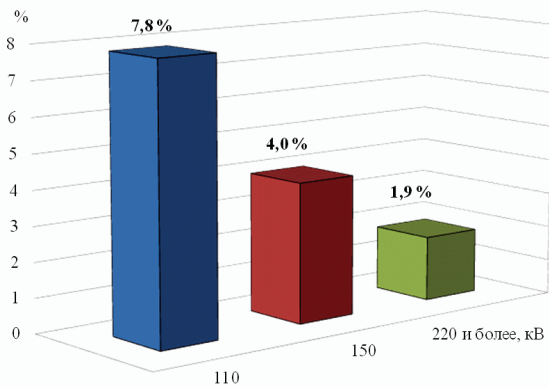


Рисунок 1 – Процентное число превышений измеренным $R_{зу}$ допустимого значения

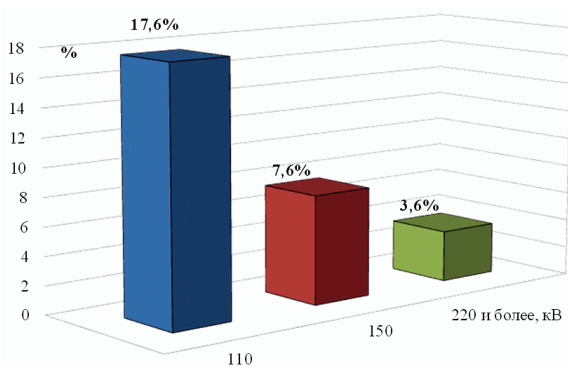


Рисунок 2 – Процентное число превышений расчетным $R_{зу}$ допустимого значения

На $U_{прик.}$ влияют четыре основных фактора: частота прокладки ГЗ вблизи оборудования с целью выравнивания потенциала, электрофизические характеристики грунта (соотношение удельных электрических сопротивлений и мощность слоев грунта), ток КЗ и наибольшая диагональ ЗУ.

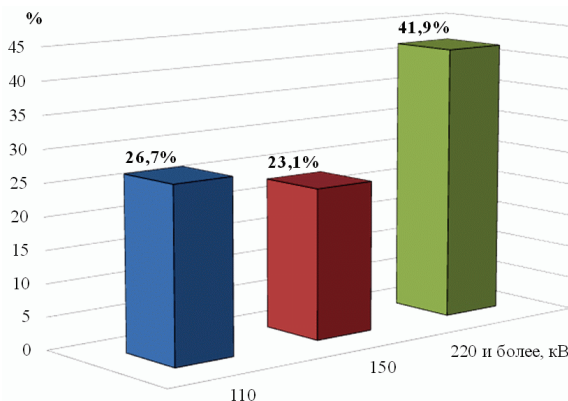


Рисунок 3 – Процентное число превышений $U_{прик.}$ допустимого значения при КЗ за пределами ОРУ

На рис. 3 и рис. 4 приведено процентное превышение допустимого $U_{прик.}$ для обследованных подстанций (см. табл. 1). При этом рассмотрены два случая однофазного КЗ: за пределами подстанции (рис. 3)

и КЗ на шинах подстанции (рис. 4). Следует отметить, что в этом случае наблюдается обратная тенденция: наиболее часто превышение допустимого значения напряжения прикосновения наблюдается на энергообъектах классом напряжения 220 и более кВ, а на энергообъектах 110 и 150 кВ частота превышения практически одинакова.

На рис. 5 приведено процентное превышение допустимого $U_{прик.}$ при КЗ на шинах подстанций для ЗУ, у которых $R_{зу}$ находится в пределах нормы (объем выборки для соответствующих классов напряжения составлял: 110 кВ – 300 подстанций, 150 кВ – 122 подстанции, 220 и более кВ – 105 подстанций).

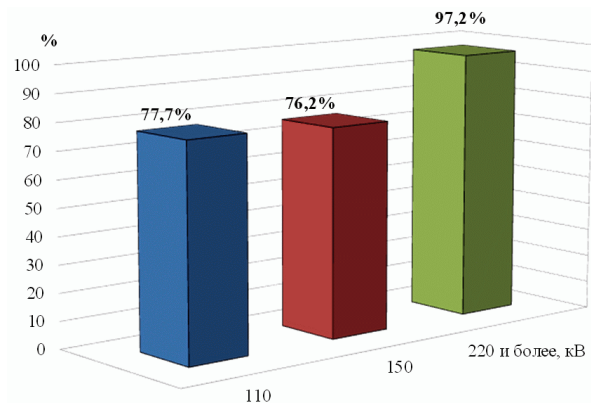


Рисунок 4 – Процентное число превышений $U_{прик.}$ допустимого значения при КЗ на ОРУ

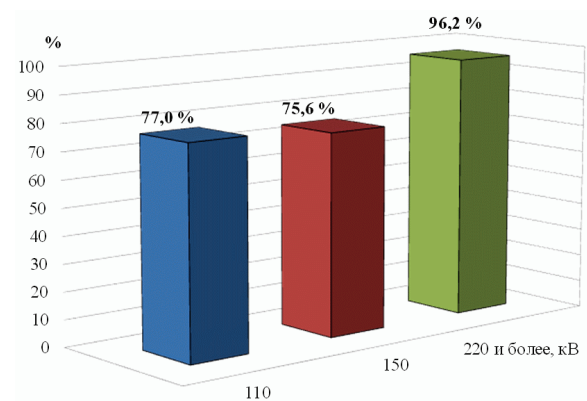


Рисунок 5 – Процентное число превышений $U_{прик.}$ допустимого значения при КЗ на ОРУ

Полученные данные соответствуют тенденции, приведенной на графике рис. 4 и являются доказательством того, что обеспечение требуемой в нормативной документации величины $R_{зу}$ для электроустановок напряжением выше 1 кВ в сети с глухозаземленной нейтралью не гарантирует электробезопасность обслуживающего персонала, т.е. при $R_{зу} < R_{зу \text{ допустимое}}$ наблюдается $U_{прик.} > U_{прик. \text{ допустимое}}$.

Как указывалось выше, величина напряжения на ЗУ также регламентируется: превышение значения 10 кВ допускается лишь на ЗУ выполненном по требованиям к $U_{прик.}$ [2]. В случае же превышения значения 5 кВ необходимо применить средства защиты изоляции кабелей связи и телемеханики, отходящих от электроустановки, и выноса высокого потенциала за ее пределы. Следует отметить, что величина на-

пряжения на ЗУ фактически определяется значением $R_{3У}$ и током КЗ.

На рис. 6 и рис. 7 приведено процентное превышение допустимого напряжения на ЗУ значений 5 и 10 кВ соответственно, для случаев, где $R_{3У}$ находится в пределах нормы (объем выборки для соответствующих классов напряжения составлял: 110 кВ – 300 подстанций, 150 кВ – 122 подстанции, 220 и более кВ – 105 подстанций).

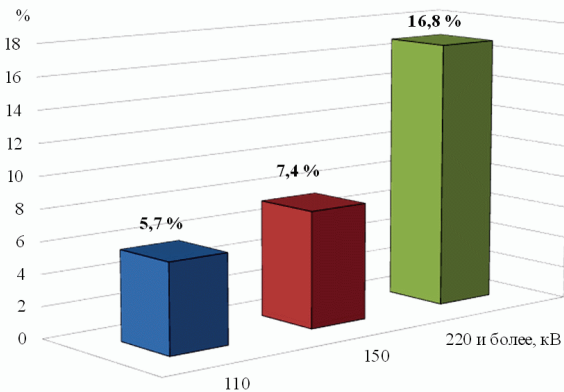


Рисунок 6 – Процентное число превышений $U_{3У}$ допустимого значения 5 кВ

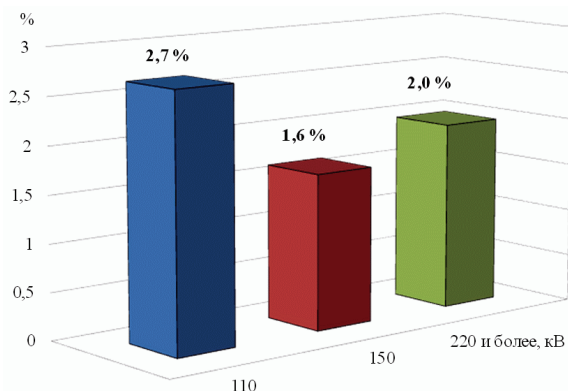


Рисунок 7 – Процентное число превышений $U_{3У}$ допустимого значения 10 кВ

Таким образом, для ряда подстанций (см. рис. 7) для ЗУ, выполненных по требованиям к $R_{3У}$, наблюдаются значения напряжения выше 10 кВ, а для значительной части подстанций (см. рис. 6) следует применять специальные средства защиты изоляции кабелей связи и телемеханики, отходящих от электроустановки, и выноса высокого потенциала за ее пределы, т.к. напряжение на ЗУ превышает 5 кВ. Для обеспечения напряжения на ЗУ в пределах регламентированных значений на указанных энергообъектах необходимо ограничивать величину $R_{3У}$ до значений существенно ниже 0,5 Ом.

Выводы

Результаты анализа нормируемых параметров ЗУ 585 действующих подстанций классом напряжения 110 и выше кВ, обследованных в период с 2001 по 2015 гг., показал:

1. Сопротивление ЗУ большинства подстанций не превышают регламентированное в нормативных до-

кументах допустимое значение.

2. У абсолютного большинства подстанций при КЗ на шинах наблюдается превышение напряжения прикосновения на обслуживаемом оборудовании (от 76,2 % до 97,2 % для соответствующих классов напряжения), даже если сопротивление ЗУ находится в пределах нормы (от 75,6 % до 96,2 % случаев превышения).

3. Короткое замыкание за пределами электроустановки приводит к превышению допустимого значения напряжения прикосновения на значительной части подстанций (от 23,1 % до 41,9 % для соответствующих классов напряжения).

4. Для значительной части электрических станций и подстанций (от 1,6 % до 16,8 %) в зависимости от класса напряжения объекта и допустимого значения напряжения на ЗУ необходимо обеспечивать сопротивление ЗУ существенно меньше 0,5 Ом.

Таким образом, удовлетворение требования по допустимому значению сопротивления ЗУ не гарантирует электробезопасность обслуживающего персонала электроустановки в случае возникновения аварийной ситуации, т.е. значение сопротивления ЗУ не позволяет однозначно судить о пригодности ЗУ к дальнейшей эксплуатации. Поэтому проведение реконструкции ЗУ действующих электроустановок предпочтительнее выполнять в соответствии с требованиями к напряжению прикосновения, что позволит обеспечить электробезопасность обслуживающего персонала во всех режимах работы.

Список литературы:

1. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009 – [Чинний від 2010–03–29]. – К. : Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с. – (Національний стандарт України).
2. Правила улаштування електроустановок. [Чинне від 20.11.2014]. – Х. : Міненерговугілля України, 2014. – 793 с. – (Національний стандарт України).
3. IEEE Std.80-2000 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. – New York : The Institute of Electrical and Electronic Engineers. – 2000. – 192 p.
4. IEEE Std. 81-2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Grounding System. – New York : The Institute of Electrical and Electronic Engineers. – P. 1– 86
5. Борисов П. К. Методика исследования заземляющих устройств объектов электроэнергетики / П.К. Борисов, Г. М. Колушко, Г.И. Гримуд и др. // Энергетика и электрификация. – 2000. – №4. – С. 29 – 32.
6. Lörtscher M. Bahnrückstromführung und Erdung beim Unterwerk Zürich der Schweizerischen Bundesbahnen / M. Lörtscher, H. Voegeli. – Zürich : Elektrische Bahnen, 2001. – Н. 1-2, S. 51-63.
7. Колушко Г. М. К вопросу повышения точности расчета нормируемых параметров заземляющих устройств действующих электроустановок / Г.М. Колушко, Д.Г. Колушко, С.С. Руденко // Электротехника и электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 65-70.
8. Колушко Д. Г. Электрофизические характеристики грунта в местах расположения энергообъектов Украины / Д. Г. Колушко, С. С. Руденко, Г. М. Колушко // Электротехника і електромеханіка. – 2015. – № 3. – С. 67-72.

References (transliterated):

1. Viprobuвання ta kontrol' pristroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktsiya. SOU 31.2-21677681-19:2009 [Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction. SOU 31.2-21677681-19:2009]. Kyiv: Minenergovugillya Ukrainy Publ., 2010. 54 p.

2. Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. [Rules of the device electroinstallations]. Kharkiv: Minenergovugillya Ukrainy Publ., 2014. 793 p.

3. IEEE Std.80-2000 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. – New York: The Institute of Electrical and Electronic Engineers. 2000. 192 p.

4. IEEE Std. 81-2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Grounding System. New York: The Institute of Electrical and Electronic Engineers. pp. 1–86

5. Borisov R. K., Koliushko G. M., Grimud G. I. [et al]. Technique to study the ground grids of electric power facilities.

Energetika i elektrifikatsiya – Energy and Electrification, 2000, no. 4, pp. 29 – 32.

6. Lörtscher M., Voegeli H. Bahnrückstromführung und Erdung beim Unterwerk Zürich der Schweizerischen Bundesbahnen. Zürich: Elektrische Bahnen, 2001. H. 1-2, S. 51-63.

7. Koliushko G. M., Koliushko D. G., Rudenko S. S. On the problem of increasing of the computation accuracy for rated parameters of active electrical installation ground grids. Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2014 no.4, pp. 65-70. (Rus) doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13

8. Koliushko D. G., Rudenko S. S. Analysis of electro-physical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine. Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2015, no.3, pp. 67-72. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10

Поступила (received) 10.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз стану заземлювальних пристроїв діючих енергооб'єктів України / Д. Г. Колюшко, С. С. Руденко, Г. М. Колюшко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 44-48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Анализ состояния заземляющих устройств действующих энергообъектов Украины / Д. Г. Колюшко, С. С. Руденко, Г. М. Колюшко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 44-48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Analysis state of grounding grids of existing power plants of Ukraine / D. G. Koliushko, S. S. Rudenko, G. M. Koliushko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 44-48. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Колюшко Денис Георгійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи», старший науковий співробітник, НТУ «ХПІ», e-mail: den@kpi.kharkov.ua

Колюшко Денис Георгиевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Автоматизированные электромеханические системы», старший научный сотрудник, НТУ «ХПІ», e-mail: den@kpi.kharkov.ua.

Koliushko Denys Georgiyovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Research Officer at the Department of «Automated electromechanical systems, Senior Research Scientist, NTU "KhPI", e-mail: den@kpi.kharkov.ua.

Руденко Сергій Сергійович – молодший науковий співробітник НДПКИ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел.: (054) 707-66-71; e-mail: serhij_rudenko@ukr.net

Руденко Сергей Сергеевич – младший научный сотрудник НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ»; тел.: (054) 707-66-71; e-mail: serhij_rudenko@ukr.net

Rudenko Serhiy Serhiyovych – Research Assistant of Design -&- Research Institute "Molniya", NTU "KhPI"; tel.: (054) 707-66-71; e-mail: serhij_rudenko@ukr.net.

Колюшко Георгій Михайлович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ «ХПІ» провідний науковий співробітник НДПКИ «Молнія»; тел.: (054) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Колюшко Георгий Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НТУ «ХПІ», ведущий научный сотрудник НИПКИ «Молния»; тел.: (054) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Koliushko Georgiy Mykhaylovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Research Scientist, NTU "KhPI", Leading Researcher of Design -&- Research Institute "Molniya"; tel.: (054) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

УДК 621.396.67

*А.И. КОРОБКО, З.И. КОРОБКО***МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕННАХ ВО ВРЕМЕННОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ**

Наведено обґрунтування і опис розробленої методики фізичного моделювання імпульсних електромагнітних процесів в надширокопосмугових антенах у часовому представленні. Експериментальна методика фізичного моделювання дозволяє визначити просторово-часові і амплітудно-часові характеристики імпульсного електромагнітного поля, яке випромінюється антеною, а також характеристики антени як елемента радіосхем. Наведено опис і характеристики основних складових частин фізичної моделі: імпульсного джерела живлення, антени, системи вимірювання та реєстрації просторово-часових і амплітудно-часових параметрів імпульсного електромагнітного поля. Представлені експериментальні результати по визначенню основних характеристик складових частин фізичної моделі. Розроблено методику визначення основних метрологічних характеристик системи вимірювання часових параметрів імпульсного електромагнітного поля. Як приклад представлено результати фізичного моделювання взаємодії електромагнітного поля в далекій зоні V-подібної антени з об'єктом впливу.

Ключові слова: методика фізичного моделювання, фізична модель, часове представлення, імпульсне електромагнітне поле, випромінювання, просторово-часові параметри, амплітудно-часові параметри.

Приведено обоснование и описание разработанной методики физического моделирования импульсных электромагнитных процессов в сверхширокополосных антеннах во временном представлении. Экспериментальная методика физического моделирования позволяет определить пространственно-временные и амплитудно-временные характеристики импульсного электромагнитного поля, которое излучается антенной, а также характеристики антенны как элемента радиосхем. Приведено описание и характеристики основных составных частей физической модели: импульсного источника питания, антенны, системы измерения и регистрации пространственно-временных и амплитудно-временных параметров импульсного электромагнитного поля. Представлены экспериментальные результаты по определению основных характеристик составных частей физической модели. Разработана методика определения основных метрологических характеристик системы измерения временных параметров импульсного электромагнитного поля. В качестве примера представлены результаты физического моделирования взаимодействия электромагнитного поля в дальней зоне V-образной антенны с объектом воздействия.

Ключевые слова: методика физического моделирования, физическая модель, временное представление, импульсное электромагнитное поле, излучение, пространственно-временные параметры, амплитудно-временные параметры.

The justification and description of the developed technique for physical simulation of pulsed electromagnetic processes in ultra-wideband antennas is presented in a temporary presentation. The experimental technique of physical modeling allows to determine the space-time and amplitude-time characteristics of the pulsed electromagnetic field, which is emitted by the antenna and also the characteristics of the antenna as an element of the radio circuits. The description and characteristics of the main components of the physical model are given: an impulse power supply, antennas, a system for measuring and recording the space-time and amplitude-time parameters of a pulsed electromagnetic field. Experimental results are presented for the determination of the main characteristics of the constituent parts of the physical model. A method for determining the basic metrological characteristics of a system for measuring the time parameters of a pulsed electromagnetic field has been developed. As an example, the results of physical modeling of the interaction of an electromagnetic field in the far zone of a V-shaped antenna with an object of influence are presented.

Keywords: physical modeling technique, physical model, time representation, pulsed electromagnetic field, radiation, space-time parameters, amplitude-time parameters.

Введение. Сверхширокополосные (СШП) антенны применяются для излучения и приема электромагнитных сигналов в широком частотном диапазоне.

СШП антенны могут использоваться в двух принципиально различных режимах: для относительно узкополосных сигналов, когда свойство широкополосности позволяет работать в различных частотных диапазонах поочередно; для СШП импульсных сигналов с широким спектром.

Первый режим типичен для задач радиосвязи, радимониторинга и узкополосной радиолокации, второй режим характерен для генерации и приема мощных электромагнитных импульсов (имитация электромагнитных импульсов ядерных взрывов, генерация импульсных электромагнитных помех, СШП видеоимпульсная локация и др.).

Соответственно разнятся и виды представлений типовых характеристик антенн в этих режимах: час-

отное (например, амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики) для первого режима; временное (пространственно-временные параметры ПВП) и амплитудно-временные параметры (АВП) для второго режима. Последние характеристики определяют как полевые нестационарные электромагнитные процессы в СШП антеннах, так и переходные процессы в электрических цепях схемы замещения антенны совместно с источником ее питания.

Существующие методы решения. Задача исследования нестационарных импульсных электромагнитных процессов в СШП антеннах является очень сложной и не имеет строгого аналитического решения.

Все существующие аналитические и численные подходы к решению данной проблемы базируются исключительно на приближенных методах.

Аналитические методы решения можно условно разделить на схмотехнические и полевые. Суть схмотехнических методов состоит в замене СШП антенны ее эквивалентной схемой замещения, определении токов и напряжений на элементах СШП антенны и определении ее характеристик на основе полученных токов и напряжений. Исторически первым данным подход к СШП антенне в виде биконуса применил Шелкунов [1], который представил биконусную антенну конечных размеров в виде эквивалентной схемы, состоящей из регулярной линии в Т-приближении, нагруженной на конце последовательно соединенными активным сопротивлением (имитация потерь на излучение) и емкостным элементом (имитация краевых эффектов и самого излучения). Данный подход получил свое развитие для СШП антенн в виде симметричного ТЕМ рупора в работах [2,3]. Недостатком данного подхода является его искусственность, заключающаяся в необходимости распространения полученных данных в виде токов и напряжений на полевые характеристики антенн.

Один из аналитических полевых методов базируется на получении аналитических выражений для основного типа волн в СШП антеннах (это, как правило, волны типа Т), волн высших типов (волны Е- и Н-типов) и последующей шивкой полученных решений с учетом граничных и начальных условий [4]. Недостаток данного подхода – ограниченность типов СШП антенн, для которых этот подход применим и сложность аналитического решения. Другой аналитический полевой подход базируется на принятых физических допущениях при решении уравнений Максвелла. Так, в работе [5] на основании приближений геометрической оптики были получены приближительные решения для АВП импульсного электромагнитного поля, генерируемого в дальней зоне СШП антенной типа IRA. В силу принятых допущений полученные решения были неточными по АВП и не давали ответ на вид ПВП.

Численные методы решения в настоящее время получили наибольшее распространение [6 - 14] в силу развития вычислительной техники, их общими недостатками являются: ограниченность пространства, в котором полученные решения являются корректными; крайняя сложность учета влияния параметров импульсного источника питания СШП антенн на ПВП и АВП генерируемого поля.

Свободным от указанных недостатков является методология физического моделирования нестационарных импульсных электромагнитных процессов, реализованная в [15]. При этом были использованы дорогостоящие уникальные стандартные приборы и нестандартные средства измерения:

- средства регистрации АВП (регистратор однократных импульсов Tektronix TDS 6604B, полоса 6 ГГц, стробоскопические осциллографы: TMR7218, полоса рабочих частот 18 ГГц, в защищенном от электромагнитных воздействий исполнении; Tektronix DSA 8200, полоса 30 ГГц);

- тестовые генераторы электрических импульсов субнаносекундной длительности (с амплитудой от 1 В

до 40 В и с длительностью перепада напряжения от 13 пс);

- средства измерения импульсных высоковольтных напряжений и напряженности электрического поля импульсного излучения с длительностью фронта переходной характеристики не хуже 20 пс.

Перечисленные приборы и средства измерений по своим техническим характеристикам позволяют производить физическое моделирование нестационарных импульсных электромагнитных процессов для импульсов с шириной спектра до 2–7 ГГц, однако, приведенные характеристики не учитывают двух важных факторов, дополнительно ограничивающих максимальную ширину спектра:

- все вышеперечисленные приборы и средства измерения имеют входные и выходные активные импедансы, равные 50 Ом;

- кабельные линии передачи аналоговых сигналов (в виде коаксиальных кабелей) от тестовых генераторов до СШП и от измерителей до регистраторов также имеют импеданс, равный 50 Ом.

Первый фактор существенно ограничивает номенклатуру моделируемых СШП антенн (они должны иметь аналогичный импеданс, или дополнительное устройство сверхширокополосного согласования с импедансом 50 Ом). Кроме этого, оба фактора уменьшают ширину спектра исследуемых импульсов с теоретически возможной максимальной величины 2–7 ГГц до существенно меньших значений, обусловленных влиянием потерь в коаксиальных кабелях конечной длины.

Данный момент иллюстрирует рис. 1, на котором представлены переходные характеристики реального коаксиального кабеля с учетом потерь в проводниках и диэлектрике для различных длин [16].

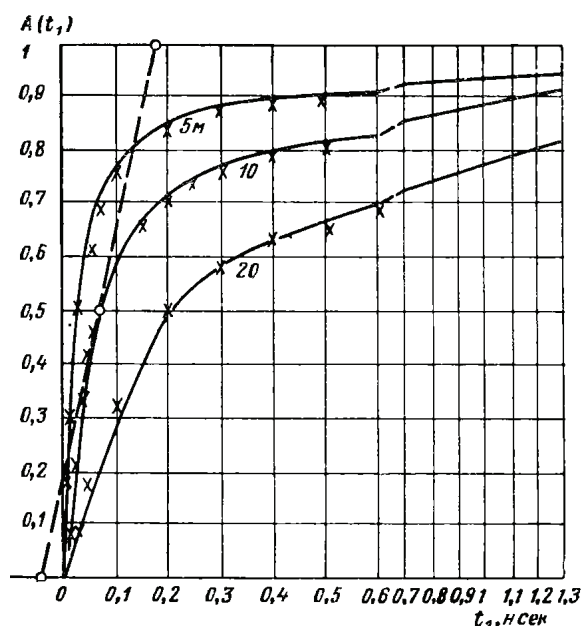


Рисунок – 1 Переходные характеристики кабеля РК-75-4-15 длиной 5, 10 и 20 м с учетом потерь в проводниках и диэлектрике.

Как видно из представленных данных, реальные

коаксиальные кабели конечной длины существенно уменьшают максимально допустимую ширину спектра исследуемых импульсов (до 0,5 ГГц для одного рассматриваемого кабеля длиной 5 м).

Целью работы является разработка и практическая реализация методики физического моделирования свободной от ограничений по величине импеданса импульсного источника питания и ширине частотного спектра.

Задача разработки и практической реализации методики физического моделирования включает в себя методологическую и аппаратную части.

В методологическом аспекте единственным выходом для исследования АВП и ПВП нестационарного импульсного электромагнитного поля с реальной шириной спектра до 10–50 ГГц является масштабное физическое моделирование.

Суть предлагаемого метода масштабного физического моделирования состоит в одновременном увеличении геометрических размеров физических моделей реальных СШП антенн (по сравнению с реальными антеннами) с одновременной «растяжкой» по времени электромагнитных процессов в модели [17]. При этом ширина спектра электромагнитного поля модели СШП антенны уменьшается (коэффициент уменьшения равен коэффициенту геометрического масштабирования), что позволяет использовать более низкочастотные приборы.

Погрешности такого физического моделирования определяются исключительно разностью активных потерь в проводниках самой СШП антенны и ее модели (явление скин-эффекта), а также в диэлектрических средах, окружающих моделируемую антенну и ее физическую модель [17]. Для реальных конструкций СШП антенн эти погрешности не превосходят нескольких процентов, так как электроды антенн выполняются из хорошо проводящих материалов, а потерями в воздухе можно пренебречь в отсутствие электрического пробоя.

Аппаратная часть физической модели, реализованная применительно к моделированию нестационарных электромагнитных процессов в симметричном регулярном ТЕМ рупоре, показана на рис. 2, а блок-схема физической модели для определения АВП исследуемого электромагнитного поля представлена на рис. 3.

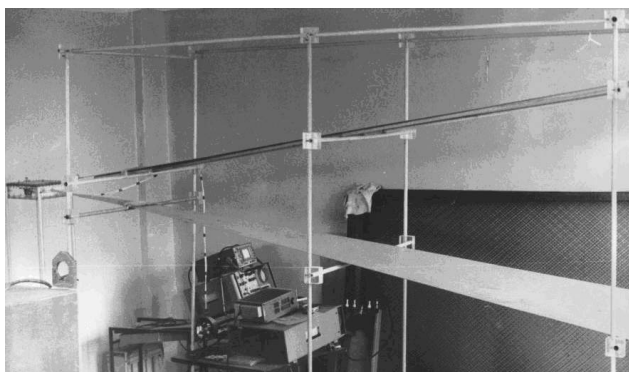


Рисунок 2 – Общий вид физической модели

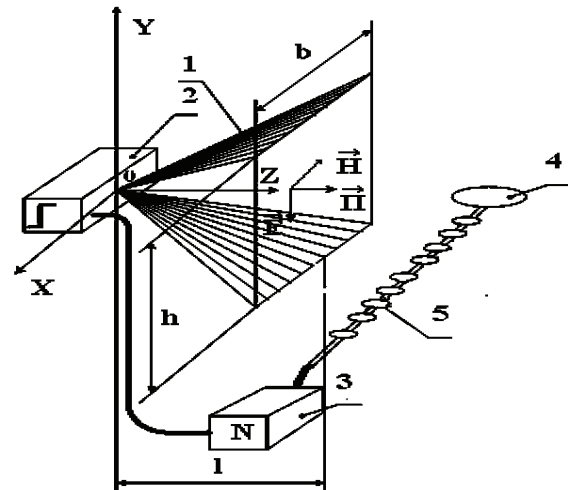


Рисунок 3 – Блок-схема физической модели для определения АВП нестационарного импульсного электромагнитного поля симметричного регулярного ТЕМ рупора: 1 – ТЕМ рупор, 2 – импульсный источник питания, 3 – осциллографический регистратор, 4 – измерительный преобразователь E- и H-составляющих электромагнитного поля, 5 – кабельная линия передачи информации

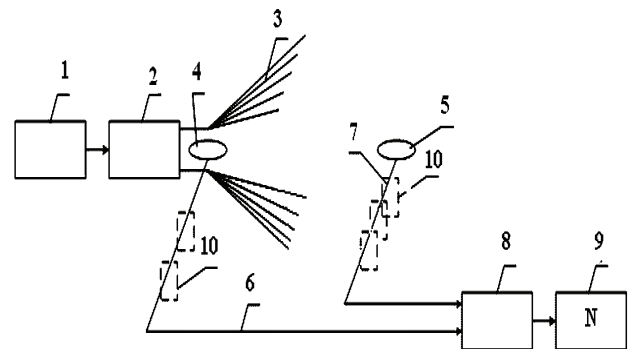


Рисунок 4 – Блок-схема физической модели для определения ПВП нестационарного импульсного электромагнитного поля симметричного регулярного ТЕМ рупора: 1 – блок питания, 2 – импульсный источник питания, 3 – ТЕМ рупор, 4 – опорный измерительный преобразователь, 5 – основной измерительный преобразователь E- и H-составляющих электромагнитного поля, 6 – кабельные линии передачи информации, 7 – устройства квазигальванической развязки, 8 – дифференциатор, 9 – осциллографический регистратор

Для определения ПВП исследуемого электромагнитного поля была реализована конфигурация физической модели, представленная на рис. 4.

При этом были использованы два измерительных преобразователя, один из которых помещался в фиксированную точку 0 (см. рис. 3), а второй перемещался по исследуемому объему.

По разности времен прихода электрических импульсных сигналов можно определить ПВП излучаемого электромагнитного поля и определить такую важную характеристику СШП антенны как ее фазовый центр.

Система измерения АВП параметров состоит из измерителей E и H – составляющих импульсного электромагнитного поля. Общий вид измерителей представлен на рис. 5, 6, а блок-схема измерителя применительно к E – составляющей поля – на рис. 8.

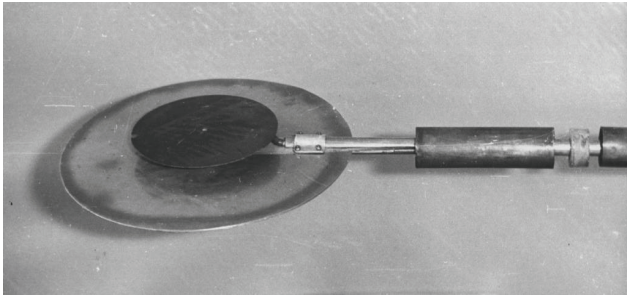


Рисунок 5 – Общий вид дифференциального измерителя E-составляющей с элементами квазигальванической развязки

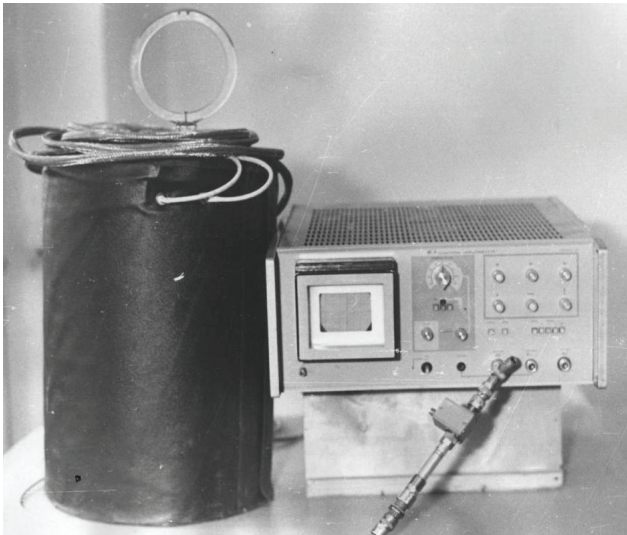


Рисунок 6 – Общий вид измерителя H-составляющей в составе: дифференциальный индукционный измерительный преобразователь, кабельная линия передачи информации; дифференциальный кабельный трансформатор; скоростной осциллографический регистратор типа С7-19

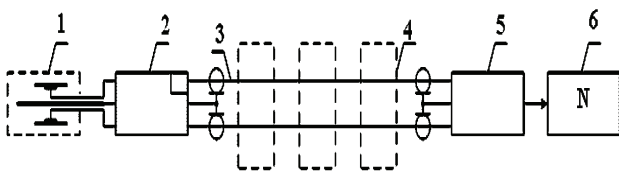


Рисунок 7 – Блок-схема дифференциального измерителя E-составляющей: 1 – дифференциальный измерительный преобразователь емкостного типа, 2 – дифференциальный СШП усилитель, 3 – кабельная линия передачи информации, 4 – элементы квазигальванической развязки, 5 – дифференциальный трансформатор, 6 – осциллографический регистратор

В качестве измерительных преобразователей использованы пассивные преобразователи индукционного и емкостного типов с RL и RC пассивными интеграторами соответственно.

Системы измерения АВП и ПВП параметров имеют одинаковые характеристики (без учета дифференциатора 8 на рис. 4).

Время нарастания при использовании в качестве регистраторов стробоскопического осциллографа С7-7 и скоростного осциллографа С7-19 не превышает 0,5 нс.

Минимальные величины регистрируемых максимальных значений E- и H-составляющих электромаг-

нитного поля не превышают 0,3 В/м и 0,8 мА/м соответственно и ограничены, в основном, уровнем электромагнитных помех в месте размещения физической модели.

Максимальные значения измеряемых полей – не менее 1000 кВ/м и 2650 А/м (без усилителя 2 на рис. 8).

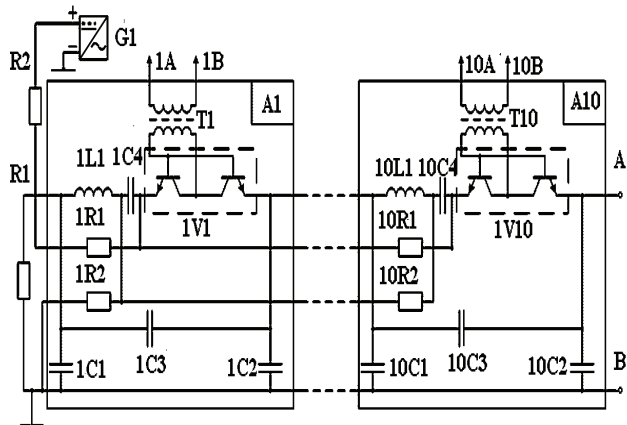


Рисунок 8 – Схема импульсного источника питания физической модели (вариант по схеме Аркадьева – Маркса)

Для физической модели был разработан импульсный источник питания (см. рис. 8), который состоит из функционально законченных блоков А1 – А10, число, конфигурация и параметры которых определяются требованиями по АВП импульсных напряжений и токов, которые необходимо подавать на вход СШП антенны (точки А и В).

Каждый из блоков включает в себя накопительные элементы распределенного или сосредоточенного типа (в данном варианте – конденсаторы 1С4 – 10С4), элементы формирования АВП (1L1 – 10L1, C1 – 10C1, 1C2 – 10C2, 1C3 – 10C3), зарядные резисторы R2, 1R1 – 10R1, 1R2 – 10R2, транзисторные двухсторонние коммутаторы 1V1 – 10V1, источник питания G1. Резистор R1 определяет внутреннее сопротивление импульсного источника питания, которое может существенно отличаться от стандартной величины 50 Ом как в большую, так и в меньшую сторону. Включение коммутаторов возможно по любой временной циклограмме, оно обеспечивается подачей на выходы 1А, 1В – 10А, 10В импульсных трансформаторов 1Т1 – 10Т1 управляющих запускаяющих импульсов. Максимальное рабочее напряжение одного блока – до 300 В, время нарастания тока – более 0,5 нс.

Данные параметры импульсного источника питания позволяют получать на входе СШП антенны субнаносекундные и наносекундные импульсы напряжения с максимальным значением до 3 кВ.

Результаты экспериментальных исследований. Для подтверждения основных характеристик модели предварительно были определены полевые переходные характеристики измерителей E- и H-составляющих, а также время нарастания фронта импульса выходного напряжения импульсного источника питания в самом «жестком» режиме его работы –

на активную нагрузку 5 Ом.

Для определения полевой переходной характеристики измерителей была использована физическая модель, представленная на рис. 2, измерительные преобразователи помещались на оси OZ модели при $0 < Z < 1$ (см. рис. 3). При этом, временные параметры импульсного электромагнитного поля в точке размещения измерительных преобразователей соответствовали аналогичным параметрам импульса напряжения в точках А и В рис. 8, а характеристики максимальных значений определялись из [4] (как компоненты сферической Т – волны без учета отражений).

Типовая полевая переходная характеристика измерителей представлена на рис. 9.

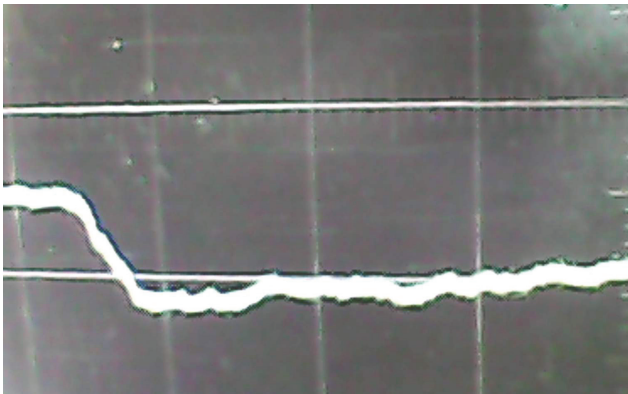


Рисунок 9 – Типовая полевая переходная характеристика измерителей (1 нс/ дел., осциллограф С7-7)

Осциллограмма напряжения на выходе импульсного источника питания на нагрузке 5 Ом (режим одновременного срабатывания коммутаторов, накопительные элементы – коаксиальные линии) приведена на рис. 10.

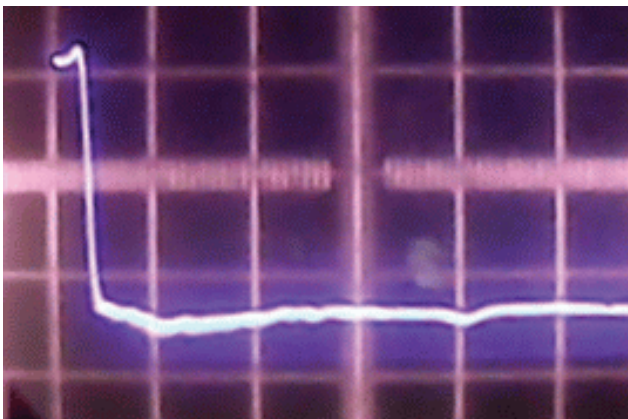


Рисунок 10 – Напряжение на выходе импульсного источника питания (2,5 нс/дел., осциллограф С7-19)

Типовая осциллограмма для определения ПВП электромагнитного поля представлена на рис. 11. При этом импульсный источник питания генерировал импульсы типа импульса Гаусса, опорный измерительный преобразователь помещался в точке $X = Y = Z = 0$ (см. рис. 4), а основной преобразователь – в искомой точке.

По временному интервалу между импульсами

можно определить время запаздывания в искомой точке и, таким образом, пространственно – временную структуру импульсного электромагнитного поля (в том числе и фазовый центр СШП антенны).

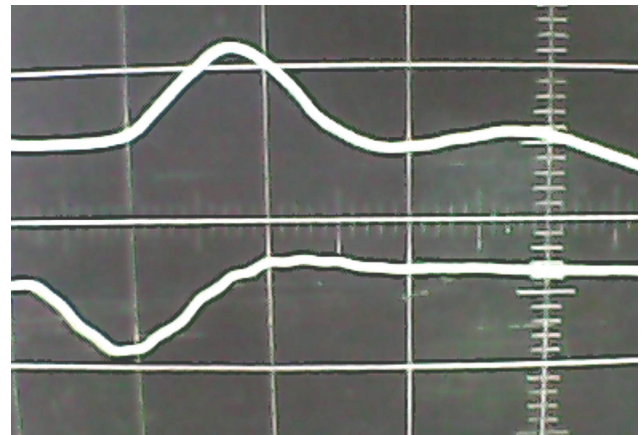


Рисунок 11 – Типовая осциллограмма для определения ПВП (нижний луч – опорный измеритель, верхний луч – основной измеритель, 1 нс/дел., осциллограф С7 - 7)

Для иллюстрации возможностей предложенного метода физического моделирования и подтверждения технических характеристик модели было проведено моделирование процессов в V – антенне, численное решение для поля которой в дальней зоне было получено в [14] для случая возбуждения антенны импульсом напряжения типа импульса Гаусса.

Типовая осциллограмма поля в дальней зоне, полученная на физической модели представлена на рис. 12, а определенное двумя типами численных методов поле в дальней зоне [14] – на рис 13.



Рисунок 12 – Поле в дальней зоне, физическое моделирование (V – антенна, длина плеч 60 см, угол раскрытия 60°, 10 нс /дел., осциллограф С7-7)

Сравнение данных физического моделирования и численных методов расчета показывает, что при общем совпадении характера изменения поля в дальней зоне после первого периода колебаний наблюдается существенное отличие численных и экспериментальных данных для первого периода.

Это отличие заключается в появлении необъяснимого с физической точки зрения первого отрицательного полупериода колебаний на рис. 13.

Данный факт свидетельствует о том, что предло-

женный метод физического моделирования позволяет получать более достоверные результаты по сравнению с расчетными методами.

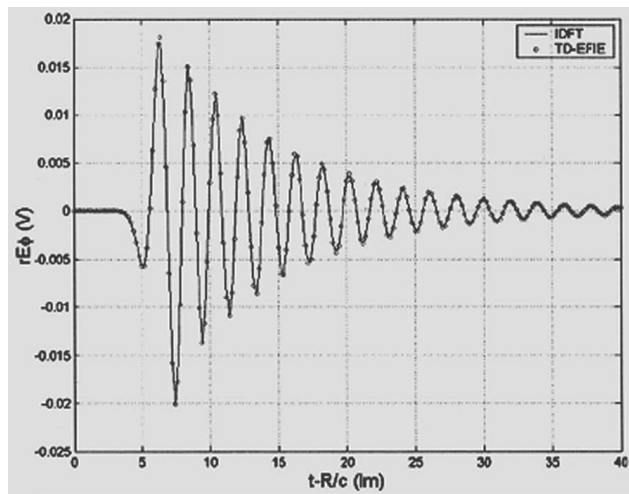


Рисунок 13 – Поле в дальней зоне, численное решение [14] (V – антенна, длина плеч 60 см, угол раскрыва 60°)

Заключение. Разработанный и практически реализованный метод физического моделирования с масштабированием геометрических размеров СШП антенн и расширенным диапазоном импедансов импульсных источников их питания позволяет достоверно моделировать нестационарные импульсные электромагнитные процессы для любых типов СШП антенн с питанием их импульсами напряжения и тока.

Список литературы:

1. Шелкунов С.А. Антенны / С.А.Шелкунов, Г. А. Фриис. Пер. с англ. Под ред. Л.Д. Бахраха. – М.: Сов. радио, 1955. – 604 с.
2. Макурин М.Н. Эквивалентная схема, моделирующая входной импеданс биконической антенны / М.Н. Макурин, В.В. Кирьяшкин, Н.П. Чубинский // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН, 26-30 октября 2009 г. – Москва. – С. 12-16. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/library/3conference/pdf/files/a003.pdf>
3. Коробко А.И. Определение коэффициента отражения от открытой апертуры биконической антенны и регулярного TEM рупора симметричного типа в частотном и временном представлении методом имитационного моделирования / А.И. Коробко, З.И. Коробко // Вісник НТУ «ХП», Серія «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 36 (1208). – С. 42-46.
4. Коробко А.И. Решение задачи распространения Т-волны в конической линии / А.И. Коробко, З.И. Коробко // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Електроенергетика та перетворююча техніка». – Х.: НТУ «ХП», 2003. – № 1. – С. 109-112.
5. Podosenov S.A. Transient radiation of traveling waves by ire antennas// S.A. Podosenov, Y.G. Svekis, A.A. Sokolov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – Aug. 1995. – Vol. 37, No 3. – PP. 367-383.
6. Kao Ch.-P. Design and Analysis of UWB TEM Horn Antenna for Ground Penetrating Radar Applications / Ch.-P. Kao, J. Li, R. Liu // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 6-11 2008, Boston, USA. – P. 569-572.
7. Tan A.E.-Ch. Design of Transverse Electromagnetic Horn for Concrete Penetrating Ultra-Wideband Radar / A.E.-Ch.

Tan, K. Jhamb, K. Rambabu // Antennas and Propagation, IEEE Transactions. – Vol. 60, Is. 4. – PP. 1736-1743.

8. Ефимова Н.А. Минимизация искажений диаграммы направленности рупорных антенн в сверхширокой полосе частот / Н.А. Ефимова // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – № 1. – С. 39-44. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/minimizatsiya-iskazheniy-diagrammy-napravlenosti-rupornyh-antenn-v-sverhshirokoy-polose-chastot>

9. Калугин Д.С. О визначенні часових характеристик короткоімпульсних антен методом Кірхгофа-Котлера / Д.С. Калугин, М.Г. Іванець, А.М. Безверхий // Системи озброєння і військова техніка. – 2012. – № 4. – С. 99-101.

10. Franek O. Spherical Horn Array for Wideband Propagation Measurements / O. Franek, G. Friis // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2011. – Vol. 59, Is. 7. – PP. 2654-2660. – Режим доступа: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/2108>

11. Макурин М.Н. Расчет характеристик биконической антенны методом частичных областей / М.Н. Макурин, Н.П. Чубинский // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52. № 10. – С. 1199 -1208. – Режим доступа: <http://naukarus.com/raschet-harakteristik-bikonicheskoy-antenny-metodom-chastichnyh-oblastey>

12. Моделирование антенн в ANSYS HFSS. – Режим доступа: https://docviewer.yandex.ua/?url=http%3A%2F%2Fcae-expert.ru%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fmodelirovanie_antenn_vansys_hfss.pdf&name=modelirovanie_antenn_v_ansys_hfss.Pdf&lang=ru&c=58d6a273d428

13. Моделирование антенн. Советы при моделировании использованием CST STUDIO SUITE. – Режим доступа: https://docviewer.yandex.ua/?url=http%3A%2F%2Fwww.eurointech.ru%2Fproducts%2FCST%2FCST_Advices_for_Antenna_Design_Rus.pdf&name=CST_Advices_for_Antenna_Design_Rus.pdf&lang=ru&c=58d6a2f71fb7

14. Ji I. Solving Time Domain Electric Field Integral Equation for Thin-Wire Antennas Using the Laguerre Polynomials / I. Ji, I.T.K. Sarkar, I.B.H. Jung, Salazar-M. Palma // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 7, Edited by Frank Sabath, Eric L. Mokole, Uwe Schenk and Daniel Nitsch. – Library of Congress, Control Number: 2006939573. Springer Science-Business Media, LLC, 2007, New York, USA. – PP. 159-171.

15. Лаборатория № 41 СИ ТЭС: Лаборатория мощных электромагнитных воздействий. – Режим доступа: pandia.ru/text/78/045/38895.php

16. Моругин Л.А. Наносекундная импульсная техника / Л.А. Моругин, Г.В. Глебович. – М.: Сов. радио, 1964. – 628 с.

17. Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. и перераб. / В.А. Веников. – М.: «Высш. школа», 1976. – 479 с.

References (transliterated):

1. Shchelkunov S.A., Friis G. A. Antenny [Antennas]. Per. s angl. Pod red. Bakhraha L.D. Moscow: Sov. radio, 1955. 604 p.
2. Makurin M.N., Kir'yashkin V.V., Chubinskiy N.P. Ekvivalentnaya skhema, modeliruyushchaya vkhodnoy impedans bikonicheskoy anteny [Equivalent circuit simulating the input impedance of a biconical antenna]. III Vserossiyskaya konferentsiya «Radiolokatsiya i radiosvyaz» – IRE RAN, 26-30 oktyabrya 2009 g. Moskov. pp. 12-16. Internet: <http://jre.cplire.ru/jre/library/3conference/pdf/files/a003.pdf>
3. Korobko A.I., Korobko Z.I. Opredelenie koeffitsienta otrazheniya ot otkrytoy apertury bikonicheskoy anteny i regul'yarnogo TEM rupora simmetrichnogo tipa v chastotnom i vremennom predstavlenii metodom imitatsionnogo modelirovaniya [Determination of the reflection coefficient from the open aper-

ture of a biconical antenna and a regular symmetric-type horn TEAM in frequency and time representation by the simulation simulation method]. *Visnik NTU «KhPI», Seriya «Tekhnika ta elektrofizika visokikh naprug»*. Kharkiv: KhPU «KhPI», 2016. No 36 (1208). PP. 42-46.

4. Korobko A.I., Korobko Z.I. Reshenie zadachi rasprostraneniya T – volny v konicheskoy linii [Solution of the problem of propagation of a T - wave in a conical line]. *Visnik NTU «KhPI». Tematichnyi vipusk «Elektroenergetika ta peretvoryuyucha tekhnika»*. Kharkiv: KhPU «KhPI», 2003. No 1. PP. 109-112.

5. Podosenov S.A., Svekis Y.G., Sokolov A.A. Transient radiation of traveling waves by ire antennas. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. Aug. 1995. Vol. 37, No 3. PP. 367-383.

6. Kao Ch.-P., Li J., Liu R. Design and Analysis of UWB TEM Horn Antenna for Ground Penetrating Radar Applications. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, July 6-11 2008, Boston, USA. PP. 569-572.

7. Tan A.E.-Ch., Jhamb K., Rambabu K. Design of Transverse Electromagnetic Horn for Concrete Penetrating Ultra-Wideband Radar. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions*. Vol. 60, Is. 4. PP. 1736-1743.

8. Efimova N.A. Minimizatsiya iskazheniy diagrammy napravlenosti rupornykh antenn v sverkhshirokoy polose chastot [Minimization of the distortions of the directivity pattern of horn antennas in the ultra-wide frequency band]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*. 2015. No 1. PP. 39-44. Internet: <http://cyberleninka.ru/article/n/minimizatsiya-iskazheniy-diagrammy-napravlenosti-rupornykh-antenn-v-sverkhshirokoy-polose-chastot>

9. Kaluhyn D.S., Ivanets' M. H., Bezverkhyy A. M. O vyznachenni chasovykh kharakterystyk korotkoimpul'snykh anten metodom Kirkhgofa-Kotlera [On determining the short-time characteristics of antennas by Kirchoff-Kotler]. *Systemy ozbroynennya i viys'kova tekhnika*. 2012. No 4. PP. 99-101.

10. Franek O., Frshlund Pedersen G. Spherical Horn Array for Wideband Propagation Measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2011. Vol. 59, Isd. 7. PP. 2654-2660. Internet: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/2108>

11. Makurin M.N., Chubinskiy N.P. Raschet kharakteristik bikonicheskoy anteny metodom chastichnykh oblastey [Calculation of the characteristics of a biconical antenna by the partial regions method]. *Radiotekhnika i elektronika*. 2007. Vol. 52. No 10. PP. 1199-1208. Internet: <http://naukarus.com/raschet-kharakteristik-bikonicheskoy-antenny-metodom-chastichnyh-oblastey>

12. Modelirovanie antenn v ANSYS HFSS [Simulation of antennas in ANSYS HFSS]. Internet: https://docviewer.yandex.ua/?url=http%3A%2F%2Fcae-expert.ru%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fmodelirovanie_antenn_vansys_hfss.pdf&name=modelirovanie_antenn_v_ansys_hfss.Pdf&lang=ru&c=58d6a273d428

13. Modelirovanie antenn. Sovety pri modelirovanii ispol'zovaniem CST STUDIO SUITE [Simulation of antennas. Tips for modeling using CST STUDIO SUITE]. Internet: https://docviewer.yandex.ua/?url=http%3A%2F%2Fwww.eurointech.ru%2Fproducts%2FCST%2FCST_Advices_for_Antenna_Design_Rus.pdf&name=CST_Advices_for_Antenna_Design_Rus.pdf&lang=ru&c=58d6a2f71fb7

14. Ji I., Sarkar I. T. K., Jung I. B. H., Salazar-M. Palma Solving Time Domain Electric Field Integral Equation for Thin-Wire Antennas Using the Laguerre Polynomials. *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 7*, Edited by Frank Sabath, Eric L. Mokole, Uwe Schenk and Daniel Nitsch. Library of Congress, Control Number: 2006939573. Springer Science-Business Media, LLC, 2007, New York, USA. PP. 159-171.

15. Laboratoriya №41 SI TES: Laboratoriya moshchnykh elektromagnitnykh vozdeystviy [Laboratory № 41 SI TPP: Laboratory of powerful electromagnetic influences]. Internet: <pandia.ru/text/78/045/38895.htm>

16. Morugin L.A., Glebovich G.V. Nanosekundnaya impul'snaya tekhnika [Nanosecond pulse technology]. *Moscow: Sov. radio*, 1964. 628 p.

17. Venikov V.A. Teoriya podobiya i modelirovaniya (primenitel'no k zadacham elektroenergetiki) [Theory of similarity and modeling (in relation to the tasks of the electric power industry)]. *Ucheb. posobie dlya vuzov. Izd. 2-e, dop. i pererab. Moscow: «Vyssh. shkola»*, 1976. 479 p.

Поступила (received) 14.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методика фізичного моделювання електромагнітних процесів у надширокополосних антенах у часовому представленні / А. І. Коробко, З. І. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 49-55. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-0740.

Методика физического моделирования электромагнитных процессов в сверхширокополосных антеннах во временном представлении / А.И. Коробко, З.И. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 49-55. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-0740.

Method of physical modelling of electromagnetic processes in ultra-wideband antennas in time representation / A. I. Korobko, Z. I. Korobko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 49-55. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Коробко Анатолій Іванович – кандидат технічних наук, завідувач відділу НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-62-36; e-mail: ant_korobko@ukr.net

Коробко Анатолій Іванович – кандидат технических наук, заведующий отделом НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-62-36; e-mail: ant_korobko@uke.net

Korobko Anatoliy Ivanovich – Philosophy Doctor, Head of Department of NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", phone: (057) 707-62-36; e-mail: ant_korobko@ukr.net

Коробко Зінаїда Іванівна – науковий співробітник, НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-62-36; e-mail: ant_korobko@ukr.net

Коробко Зинаида Ивановна – научный сотрудник, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел.: (057)707-62-36; e-mail: ant_korobko@ukr.net

Korobko Zinaida Ivanovna – Researcher, NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", phone: (057) 707-62-36; e-mail: ant_korobko@ukr.net

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, В.С. БРЕСЛАВЕЦ, В.В. КНЯЗЕВ, И.В. ЯКОВЕНКО**ИЗЛУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОЛЯРИТОНОВ МОДУЛИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

В роботі досліджувалися механізми збудження поверхневих поляритонів потоком заряджених частинок, модульованим на частоті поверхневої хвилі, за умов, коли він рухається по нормалі до межі провідних твердих тіл. При розв'язанні цієї задачі припускалось, що спектр потоку частинок містить дві хвилі просторового заряду. Їх амплітуди визначалися за допомогою додаткових умов для густини та швидкості носіїв на площині, яка знаходиться над межею розподілу середовищ. Застосування цих додаткових умов дозволяє визначити поля перехідного випромінювання через параметри модуляції. В роботі отримано вираз для густини потоку енергії перехідного випромінювання поверхневої хвилі.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, нестійкість, генерування, випромінювання, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

В работе исследовались механизмы возбуждения поверхностных поляритонов потоком заряженных частиц, модулированным на частоте поверхностной волны, в условиях, когда он движется по нормали к границе проводящих твердых тел. При решении этой задачи предполагалось, что спектр потока частиц содержит две волны пространственного заряда. Их амплитуды определялись с помощью дополнительных условий для плотности и скорости носителей на плоскости, которая находится над границей раздела сред. Применение этих дополнительных условий позволяет определить поля переходного излучения через параметры модуляции. В работе получено выражение для плотности потока энергии переходного излучения поверхностной волны.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, неустойчивость, генерация, излучение, заряженные частицы, поверхностные волны.

The mechanisms of excitation of surface polaritons by a flux of charged particles modulated at the frequency of a surface wave are studied in the work under conditions when it moves along the normal to the boundary of conducting solid bodies. In solving this problem, it was assumed that the spectrum of the particle flux contains two space-charge waves. Their amplitudes were determined with the aid of additional conditions for the density and velocity of the carriers in the plane that lies above the interface of the media. The use of these additional conditions makes it possible to determine the fields of transition radiation through modulation parameters. An expression for the energy flux density of the transition radiation of a surface wave is obtained.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor, instability, generation, radiation, charged particles, surface waves.

Введение

Задачи преобразования энергии токов, наведенных внешним электромагнитным излучением (ЭМИ) в колебания среды в открытых излучающих структурах приобретают все большее практическое применение. Речь идет о влиянии свойств поверхности на законы дисперсии и спектральную плотность излучения. В частности, возможность изменения пространственных и электромагнитных характеристик границы раздела сред находит свое применение в акустооптике для управления оптическим излучением [1] и в пьезоэлектронике для взаимного преобразования энергии электромагнитных и звуковых колебаний [2]. В настоящей работе исследуется влияние свойств поверхности полуграниченных твердых тел на процессы преобразования поступательного движения заряженных частиц в энергию электромагнитных колебаний в рамках теории переходного излучения, т.е. в более широком частотном диапазоне. Определены механизмы влияния модуляции на спектр поверхностных электромагнитных колебаний и механизмы их возбуждения потоком заряженных частиц, движущихся по нормали к границе. Получены выражения для спектральной плотности энергии переходного излучения в условиях, когда поток заряженных частиц, пересекающий границу раздела сред промодулирован на частоте поверхностной волны. Определены оптимальные условия для возбу-

ждения следующих типов колебаний: поверхностных поляритонов, поверхностных волн на границе сверхпроводник – вакуум, поверхностных фотонов на периодически неровной границе проводника.

Основные результаты

В работе показано, что использование потока заряженных частиц, модулированного на частоте поверхностной волны, позволяет существенным образом повысить уровень излучения, поскольку процесс излучения носит коллективный характер. Такой способ представляется нам довольно перспективным для возбуждения поверхностных волн различного рода в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.

Пусть границу $y = 0$ раздела двух сред, направленную вдоль оси абсцисс, пересекает промодулированный на частоте ω , квазинейтральный поток заряженных частиц, движущихся вдоль оси y со скоростью v_0 .

Поля, создаваемые потоком в каждой среде, будем описывать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} &= \frac{i\omega}{c} \mathbf{H}; \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = -\frac{i\omega}{c} \varepsilon \mathbf{E} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}; \\ \varepsilon \operatorname{div} \mathbf{E} &= 4\pi en; \quad \mathbf{j} = en_0(x)\mathbf{v}(x, y) + e\mathbf{v}_0 n(x, y); \quad (1) \\ \mathbf{E} &= (E_x, E_y, 0); \quad \mathbf{H} = (0, 0, H_z); \\ \varepsilon &= \varepsilon(y); \quad \varepsilon = \varepsilon_1, y \leq 0; \quad \varepsilon = \varepsilon_2, y > 0, \end{aligned}$$

где e – заряд; $n_0(x)$ – равновесная плотность электронов; n и \mathbf{v} – отклонения плотности и скорости электронов от равновесных значений. Величины n и \mathbf{v} связаны между собой системой линейных гидродинамических уравнений

$$\begin{cases} \left(-i\omega + v_0 \frac{\partial}{\partial y}\right) n + \operatorname{div} n_0 \mathbf{v} = 0; \\ \left(-i\omega + v_0 \frac{\partial}{\partial y}\right) \mathbf{v} = \frac{e}{m} \mathbf{E}. \end{cases} \quad (2)$$

Электронный пучок предполагается ограниченным в направлении x и безграничным в направлении y и z . Поскольку толщина пучка d предполагается малой по сравнению с длиной волны, будем считать, что $n_0(x) = n_{0s} \delta(x)$, где $n_{0s} = n_0 d$ – поверхностная плотность электронов. Для бесконечного «тонкого» пучка полагаем $n(x, y) = n_s(y) \delta(x)$; $v_x = 0$. После интегрирования уравнения непрерывности и уравнения Пуассона по толщине пучка, получим

$$\begin{cases} \left(-i\omega + v_0 \frac{\partial}{\partial y}\right) n_s(y) + n_{0s} \frac{\partial}{\partial y} v_y(0, y) = 0; \\ \left(-i\omega + v_0 \frac{\partial}{\partial y}\right) v_y(0, y) = \frac{e}{m \varepsilon} E_y(0, y); \\ \varepsilon(\omega) d \frac{\partial E_y(0, y)}{\partial y} = 4\pi e n_s(y). \end{cases} \quad (3)$$

Здесь мы положили

$$E_x\left(-\frac{d}{2}\right) - E_x\left(\frac{d}{2}\right) \cong E_x(0) - E_x(0) = 0.$$

Подставляя в систему (3) зависимость всех переменных величин от y в виде $e^{iq_y y}$, находим при $\omega \gg \omega_b$

$$\begin{cases} n_s(y) = n_+ e^{iq_+ y} + n_- e^{iq_- y}; \\ v_y(y) = \frac{\omega_b v_0}{\omega n_{0s}} \left(n_- e^{iq_- y} - n_+ e^{iq_+ y} \right), \end{cases} \quad (4)$$

где $q_y^\pm = \frac{\omega}{v_0} \pm \frac{\omega_b}{v_0}$; $\omega_b^2 = \frac{4\pi e^2 n_{0s}}{m d \varepsilon(\omega)}$. Амплитуды n_\pm медленной и быстрой волн пространственного заряда (ВПЗ) в среде «1» (вакууме) находятся из граничных условий на плоскости $y = -l$. В качестве таковых могут быть выбраны следующие: $v_y(-l) = v_1$; $n_s(-l) = 0$, где v_1 – скорость электрона, возникающая под действием напряжения модуляции. В результате получим

$$\begin{cases} v_y(y) = v_1 \cos \frac{\omega_b}{v_0} (l+y) e^{\frac{i\omega}{v_0}(y+l)}; \\ n_\pm^{(1)} = \mp \frac{\omega}{2\omega_b v_0} v_1 n_{0s} e^{iq_y^\pm l}; \\ n_s(y) = -i \frac{n_{0s} v_1 \omega}{v_0 \omega_b} \sin \frac{\omega_b}{v_0} (l+y) e^{\frac{i\omega}{v_0}(y+l)}; \\ j_y(y) = \frac{e n_{0s}}{d} v_1 \left[\cos \frac{\omega_b}{v_0} (l+y) - \right. \end{cases} \quad (5)$$

$$\left. -i \frac{\omega}{\omega_b} \sin \frac{\omega_b}{v_0} (l+y) \right] e^{\frac{i\omega}{v_0}(y+l)}.$$

Определим поля, создаваемые модулированным пучком. Поскольку пучок нерелятивистский, то фазовая скорость ВПЗ мала по сравнению со скоростью света, а также по сравнению с фазовой скоростью поверхностной волны. Такие поля можно считать продольными и полагать $\operatorname{rot} \mathbf{E}^l = 0$. Представим $\mathbf{E}^l(x, y, \omega)$ в виде

$$\mathbf{E}^l(x, y, \omega) = \int \mathbf{E}^l(q_x, y, \omega) e^{iq_x x} dq_x.$$

Воспользовавшись затем уравнением Пуассона (1), где $n(x, y, \omega) = n_s(y, \omega) \delta(x)$, получим для продольных полей в каждой из сред следующие выражения:

$$\begin{cases} E_x^l(q_x, y, \omega) = \frac{2eq_x}{i\varepsilon} \left(\frac{n_+}{q_+^2} \exp iq_+ y + \frac{n_-}{q_-^2} \exp iq_- y \right); \\ E_y^l(q_x, y, \omega) = \frac{2e}{i\varepsilon} \times \\ \times \left(\frac{q_+^+}{q_+^2} n_+ \exp iq_+ y + \frac{q_-^-}{q_-^2} n_- \exp iq_- y \right), \end{cases} \quad (6)$$

где

$$q_\pm^2 = q_x^2 + (q_y^\pm)^2.$$

Для нахождения амплитуды поверхностной волны к продольным полям (6) необходимо добавить поперечные $\mathbf{E}^l(x, y, \omega)$, которые представляют собой решение однородной системы (1) ($\mathbf{n} = 0$; $y = 0$)

$$\begin{cases} E_x^t(x, y, \omega) = \int B e^{i(q_x x + \kappa y)} dq_x; \\ E_y^t(x, y, \omega) = -\int \frac{q_x}{\kappa} B e^{i(q_x x + \kappa y)} dq_x; \end{cases} \quad (7)$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon - q_x^2},$$

где

$$\begin{cases} B = B_1, \quad \kappa = \kappa_1, \quad \operatorname{Im} \kappa_1 < 0 \quad \text{при } y < 0; \\ B = B_2, \quad \kappa = \kappa_2, \quad \operatorname{Im} \kappa_2 > 0 \quad \text{при } y > 0. \end{cases}$$

Неизвестные величины $B_1, B_2, n_\pm^{(2)}$ можно выразить через $n_\pm^{(1)}$, воспользовавшись граничными условиями при $y = 0$. Следует отметить, что кроме электродинамических условий непрерывности тангенциальных составляющих электрического поля и нормальных составляющих вектора индукции $D_y = \varepsilon E_y + \frac{4\pi i}{\omega} j_y$ на границе должны выполняться гидродинамические условия. Сюда относятся: непрерывность (равенство) плотности частиц и непрерывность потока частиц. Таким образом, граничные условия при $y = 0$ принимают вид

$$\begin{aligned} B_1 + \frac{2eq_x}{i\varepsilon_1} \left(\frac{n_+^{(1)}}{q_{1+}^2} + \frac{n_-^{(1)}}{q_{1-}^2} \right) &= \\ = B_2 + \frac{2eq_x}{i\varepsilon_2} \left(\frac{n_+^{(2)}}{q_{2+}^2} + \frac{n_-^{(2)}}{q_{2-}^2} \right); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_1}{\kappa_1} B_1 &= \frac{\varepsilon_2}{\kappa_2} B_2; \\ n_+^{(1)} + n_-^{(1)} &= n_+^{(2)} + n_-^{(2)}; \\ \frac{en_{0s}}{im} \int \frac{q_x B_1}{\kappa_1} dq_x + \omega_{b1} v_0 (n_-^{(1)} - n_+^{(1)}) &= \\ &= \frac{en_{0s}}{im} \int \frac{q_x B_2}{\kappa_2} dq_x + \omega_{b2} v_0 (n_-^{(2)} - n_+^{(2)}). \end{aligned} \quad (9)$$

Из соотношений (8) находим

$$B_1 = \frac{\kappa_2 \varepsilon_2 q_x}{i(\kappa_1 \varepsilon_2 - \kappa_2 \varepsilon_1)} (A_2 - A_1), \quad (10)$$

$$E_{1x}^t(x, y, \omega) = \frac{\varepsilon_2}{i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\kappa_2 q_x (A_2 - A_1)}{\kappa_1 \varepsilon_2 - \kappa_2 \varepsilon_1} e^{i(q_{xs}x + \kappa_s y)} dq_x,$$

где $A_\alpha = \frac{2e}{\varepsilon_\alpha} \left(\frac{n_+^{(\alpha)}}{q_{\alpha+}^2} + \frac{n_-^{(\alpha)}}{q_{\alpha-}^2} \right); \quad \alpha = 1, 2.$

Используя полюс подынтегрального выражения $\kappa_1 \varepsilon_2 - \kappa_2 \varepsilon_1 = 0$, где $\varepsilon_1 > 0; \varepsilon_2 < 0; \varepsilon_1 + \varepsilon_2 < 0$, получим следующую формулу для поля поверхностной волны:

$$E_{1x}^s = \frac{2\pi \varepsilon_1^2 \varepsilon_2^2 \omega^2 (A_2 - A_1)}{c^2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} \Big|_{q_x = q_{xs}} \cdot e^{i(q_{xs}x + \kappa_s y)}, \quad (11)$$

где $q_{xs} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}}; \quad \kappa_s = \frac{\omega}{c} \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}}; \quad \text{Im } \kappa_s > 0.$

Из условия (9) находим значение $A_2 - A_1$ и при $\frac{\omega^2}{v_0^2} \gg q_{xs}^2$ имеем

$$\begin{aligned} A_2 - A_1 &= \frac{2ev_0 v_1 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) n_{0s}}{\omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2} \times \\ &\times \left(2 \cos \beta - i \frac{\omega}{\omega_b} \sin \beta \right) e^{i \frac{\omega}{v_0} l}; \quad \beta = \frac{\omega_b}{v_0} l. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, амплитуда поверхностной волны определяется величиной потока частиц через границу $y = 0$.

Окончательные выражения для тангенциальной составляющей электрического поля поверхностной волны и вектора Пойтинга $S_x = \frac{c}{8\pi} \text{Re } E_y H_z^*$ в среде «1» принимают вид

$$\begin{aligned} E_{1x}^s(x, y, \omega) &= \frac{4\pi ev_0 v_1 n_{0s} \varepsilon_1 \varepsilon_2}{c^2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} \times \\ &\times \left(2 \cos \beta - i \frac{\omega}{\omega_b} \sin \beta \right) e^{i \left(q_{xs} x + \kappa_s y + \frac{\omega}{v_0} l \right)}; \quad (13) \\ S_x &= \frac{c}{8\pi} \sqrt{\left| \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right|} |E_{1x}^s|^2. \end{aligned}$$

Видно, что значение плотности потока энергии поверхностной волны осциллирует в зависимости от соотношения между периодом ленгмюровских колебаний электронов пучка и временем пролета частицей $\tau = l/v_0$ пространства l , отделяющего плоскость модуляции от границы раздела сред. Это связано с тем, что

ленгмюровские колебания переносятся в пространстве со скоростью v_0 и длина волны оказывается равной $\frac{2\pi v_0}{\omega_b}$. По условиям модуляции при $y = -l$ поток частиц минимален. Таким образом, при $\beta = N\pi$ ($N = 1, 2, 3$) на расстоянии l укладывается целое число полуволн и S_x – минимально. При $\beta = \frac{\pi}{2} (2N + 1)$ на этом расстоянии укладывается целое число четвертей волн. В этом случае на границе $y = 0$ создается максимальный поток частиц и S_x также достигает наибольшей величины, так как $\frac{\omega^2}{4\omega_b^2} \gg 1$.

Приведем для сравнения выражение для плотности потока энергии поверхностной волны, возбуждаемой заряженной лентой. Поскольку ширина ленты L меньше длины волны, то плотность заряда можно представить в виде $en(x, y, t) = en_1 \delta(y - v_0 t) \delta(x)$, где en_1 – плотность на единицу длины ленты. Легко показать, что продольное поле в каждой среде, создаваемое пространственно-временной гармоникой

$$n(x, y, \omega) = \frac{n_1}{L} e^{i \frac{\omega}{v_0} y} \delta(x),$$

$$E_x^l(q_x, y, \omega) = \frac{2eq_x v_0^2 n_{0s}}{i\omega^2 \varepsilon} e^{i \frac{\omega}{v_0} l}; \quad (14)$$

$$E_y^l(q_x, y, \omega) = \frac{\omega}{q_x v_0} E_x(q_x, y, \omega),$$

где $n_{0s} = \frac{n_1}{L}; \quad \omega^2 \gg q_x^2 v_0^2$. В этом случае E_{1x}^s – компонента поля поверхностной волны оказывается равной

$$E_{1x}^s(x, y, \omega) = \frac{4\pi en_{0s} v_0^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{c^2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} e^{i(q_{xs}x + \kappa_s y)}. \quad (15)$$

Видно, что при условии $\frac{v_1}{v_0} \gg \frac{\omega_b}{\omega}$ максимальное

значение амплитуды поля, создаваемого модулированным пучком, может значительно превышать поле, возникающее в результате переходного излучения заряженной ленты.

В заключение оценим величину плотности потока энергии поверхностной волны для различных значений диэлектрических проницаемостей граничащих сред: $\varepsilon_1 = 1; \varepsilon_2 = \varepsilon(\omega)$. В случае плазмopodobных сред (металлы, полуметаллы, полупроводники) $\varepsilon(\omega)$ имеет вид

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_0^2}{\omega(\omega + i\nu)},$$

где ω_0 – ленгмюровская частота электронов проводимости; ν – частота столкновений; ε_0 – диэлектрическая постоянная кристаллической решетки. Частота поверхностной волны ω (частота модуляции) должна удовлетворять условию $\omega_p > \omega > \nu$, где $\omega_p = \frac{\omega_0}{\sqrt{\varepsilon_0}}$.

Поскольку ε_0 и ω_0 меняются в очень широких пределах (например, $\varepsilon_0 = (1 \div 100); \quad \omega_0 = (10^{13} \div 10^{15}) \text{ c}^{-1}$), то

легко можно добиться выполнения условий $|\varepsilon(\omega)| \gg 1$. В этом случае выражение для плотности потока энергии принимает вид

$$S_x = S_0 \left(4 \cos^2 \beta + \frac{\omega^2}{\omega_b^2} \sin^2 \beta \right), \quad (16)$$

$$S_0 = \frac{2\pi e^2 v_0^2 v_1^2 n_0^2 d^2}{c^3 |\varepsilon(\omega)|}.$$

Для электронного пучка с параметрами: $v_0 = 3 \cdot 10^9$ см·с⁻¹, $n_0 = 10^{10}$ см⁻³, $d = 2 \cdot 10^{-2}$ см при $v_1 = 3 \cdot 10^8$ см·с⁻¹ получим

$$S_0 = \frac{1}{|\varepsilon|} \cdot 1,8 \cdot 10^4 \text{ CGSE} = \frac{1,8}{|\varepsilon|} \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Положим $\omega = 10^{12}$ с⁻¹. Для полупроводников типа InSb с $\varepsilon_0 = 16$ и эффективной массой электронов проводимости $m_e = 10^{-29}$ г при температуре жидкого азота $\nu = 10^{11}$ с⁻¹ и концентрации электронов проводимости $N_0 = 10^{14}$ см⁻³ $|\varepsilon(\omega)| \cong 14 \gg 1$ получим в условиях ре-

$$\text{зонанса } \beta = \frac{\pi}{2}(N+1); S_x^{\text{max}} = 42,8 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Для металлов с $\omega_0^2 = 3 \cdot 10^{31}$ с⁻², на частоте $\omega = 10^{13}$ с⁻¹, $S^{\text{max}} = 20 \frac{\text{МВт}}{\text{см}^2}$. Эта величина вполне об-

наружима.

Как известно, на границе сверхпроводник – вакуум существует поверхностная электромагнитная волна.

Дело в том, что сверхпроводящий конденсат дает существенный вклад в мнимую часть проводимости $\sigma(\omega)$, которая связана с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(\omega)$ соотношением $\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{4\pi i \sigma(\omega)}{\omega}$. При этом вещественная часть $\sigma(\omega)$ определяется нормальными возбуждениями, число которых при низких температурах оказывается экспоненциально малым. Поэтому при выполнении неравенств

$$\hbar\omega < 2\Delta; \exp(-\Delta/T) \ll 1, \quad (17)$$

вещественная часть проводимости меньше ее мнимой части, что создает предпосылки для распространения поверхностной волны. Здесь 2Δ – ширина сверхпроводящей щели; T – температура в энергетических единицах. В частности, в «грязных» сверхпроводниках (например в высокотемпературных), наряду с неравенствами (7.79) выполняются условия $\omega \ll \nu$; $\Delta \ll \hbar\nu$, и поверхностные поляритоны могут распространяться с частотами вплоть до $\omega = (10^{12} \div 10^{13})$ с⁻¹. Можно показать, что при $\omega \ll \omega_0$ диэлектрическая проницаемость приобретает вид $\varepsilon(\omega) \cong -\frac{\pi \Delta \omega_0^2}{\hbar \nu \omega^2}$, где $|\varepsilon| \gg 1$. В этом случае получим

$$S_0 = \frac{2 e^2 v_0^2 v_1^2 n_0^2 d \hbar \nu \omega^2}{c^3 \Delta \omega_0^2}. \quad (18)$$

По наблюдению переходного излучения можно судить о величине энергетической щели. Заметим, что

в нормальном состоянии поверхностные поляритоны в таких материалах не существуют.

Остановимся теперь на переходном излучении поверхностных волн модулированным потоком, пересекающим границу идеального проводника с периодически неровной поверхностью $y = \zeta(x)$; $\zeta(x) = \xi_0 \sin qx$, где ξ_0 – высота неровности; $2\pi/q$ – период неоднородности. Вдоль оси z поверхность предполагается однородной. В этом случае компоненты поперечного поля $\mathbf{E}^t(x,y,z)$ запишутся

$$E_x^t(x,y,\omega) = \sum_n \int_{-\infty}^{\infty} A_n e^{i[(q_x+qn)x+\kappa_n y]} dq_x,$$

$$E_y^t(x,y,\omega) = -\sum_n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(q_x+qn)}{\kappa_n} \times$$

$$\times A_n e^{i[(q_x+qn)x+\kappa_n y]} dq_x, \quad (19)$$

где n – целые числа; $\kappa_n = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - (q_x+qn)^2}$. Учитывая

малый параметр $\xi_0 q \ll 1$, можно перенести граничные условия – равенство нулю тангенциальной составляющей электрического поля на поверхности $y = \zeta(x)$ – на плоскость $y = 0$ и представить в виде

$$E_x(x,0) + \frac{\partial E_x}{\partial y}(x,0) \xi_0 \sin qx + E_y(x,0) \xi_0 q \cos qx = 0. \quad (20)$$

Подставляя сюда выражения для продольных (6) и поперечных (20) полей, получим бесконечную систему алгебраических уравнений, связывающих гармоники A_n с продольными полями. Ограничиваясь рассмотрением вклада в поле поперечной волны только гармоники A_0 , получим

$$E_x^t(x,y,\omega) = \frac{2ie\nu_0 v_1}{\omega^2} n_{0s} \left(2 \cos \beta - i \frac{\omega}{\omega_b} \sin \beta \right) -$$

$$- \int_{-\infty}^{\infty} \frac{q_x e^{i(q_x x + \kappa_0 y)}}{F(\omega, q_x, q)} dq_x,$$

где

$$F(\omega, q_x, q) = 1 + \frac{\xi_0^2 q^2}{4} \left[\left(\frac{\kappa_0 + q_x}{q} + \frac{q_x}{\kappa_0} \right) \times \right.$$

$$\left. \times \left(\frac{\kappa_{-1} + q - q_x}{q} + \frac{q - q_x}{\kappa_{-1}} \right) + \left(\frac{\kappa_0 - q_x}{q} - \frac{q_x}{\kappa_0} \right) \left(\frac{\kappa_1 + q + q_x}{q} + \frac{q + q_x}{\kappa_1} \right) \right].$$

Наибольший интерес представляет резонансный случай, когда совпадают волновые числа κ_0 и κ_{-1} . При этом $q = 2q_x$ и амплитуда поля E_x^t является максимальной. Взяв вычет в точке $F = 0$, находим компоненты поля поверхностной волны

$$E_x^s(x,y,\omega) = \frac{2\pi e\nu_0 v_1 \omega^2}{c^4} \xi_0^2 n_{0s} \times$$

$$\times \left(2 \cos \beta - i \frac{\omega}{\omega_b} \sin \beta \right) e^{i(q_x x + \kappa_0 y)}; \quad (22)$$

$$E_y^s = -i \frac{c}{\omega \xi_0} E_x^s.$$

Выражение для плотности потока энергии, по-прежнему, определяется формулой (16), где

$$S_0 = \frac{\pi e^2 v_0^2 v_1^2}{2c^5} \omega^2 \xi_0^2 d^2 n_0^2. \quad (23)$$

Сравнение выражений (16) и (23) показывает, что излучение поверхностных волн над периодически неровной идеально проводящей границей может превосходить излучение поверхностных поляритонов в плазменной среде с высокой концентрацией электронов проводимости $\left(\frac{1}{|\varepsilon|} \sim \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)$ при условии $\xi_0 > \frac{c}{\omega_0}$. Так, на частоте $\omega \sim 10^{12} \text{ с}^{-1}$ высота неровности ξ_0 должна быть порядка 10^{-3} см , а $\frac{c}{\omega_0} \approx 10^{-5} \text{ см}$ для металлов. При этом S^{max} достигает нескольких Вт/см².

Приведенные примеры различных сред, на границе которых могут существовать поверхностные волны, показывают реальную возможность их возбуждения с помощью модулированного электронного пучка.

Выводы:

1 Определены механизмы влияния модуляции на спектр поверхностных электромагнитных колебаний и механизмы их возбуждения потоком заряженных частиц, движущихся по нормали к границе.

2 Получены выражения для спектральной плотности энергии переходного излучения в условиях, когда поток заряженных частиц, пересекающий границу раздела сред промодулирован на частоте поверхностной волны.

3 Определены оптимальные условия для возбуждения следующих типов колебаний: поверхностных поляритонов, поверхностных волн на границе сверхпроводник – вакуум, поверхностных фотонов на периодически неровной границе проводника.

4 Установлено, что использование потоков заряженных частиц, модулированных на частоте поверхностной волны, позволяет существенным образом повысить уровень излучения, поскольку процесс излучения носит коллективный характер. Такой способ представляется довольно перспективным для возбуждения поверхностных волн в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Проведенный сравнительный анализ спектральной плотности переходного излучения показал, что излучение поверхностных волн на периодически неровной идеально проводящей границе может превосходить излучение поверхностных поляритонов в плазменной среде с высокой концентрацией электронов проводимости.

Список литературы:

1. Белецкий Н.Н. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / Н.Н. Белецкий, В.М. Светличный, Д.Д. Халамейда, В.М. Яковенко. – Киев.: Наукова думка, 1991. – 216 с.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
3. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на соприкосновения связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с.
4. Стіл М. Взаимодействие волн в плазме твердого те-

ла / М. Стіл, Б. Вюраль. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с.

5. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с.

6. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплекующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, В.И. Яковенко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 11. – С. 62–69.

7. Кравченко В.И. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 154–161.

8. Кравченко В.И. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 161–169.

9. Кравченко В.И. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплекующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83–89.

10. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89–96.

11. Кравченко В.И. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103.

12. Кравченко В.И. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 103–111.

References (transliterated)

1. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. Kiev: Naukova dumka. 1991. 216 p.
2. Zi S. Fizika poluprovodnikovyh priborov. Moscow: Mir. 1984. 456 p.
3. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Jelektromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz'. 1979. 225 p.
4. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p.
5. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 p.
6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. pp. 62–69.
7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jelektromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 154–161.
8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Gen-

eracija jelektrornagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnogo jelektrornagnitnogo vozdeystvija. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 161–169.

9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjazhennyh chastic. Navedennogo vneshnim jelektrornagnitnym izlucheniem, na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 83–89.

10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnogo jelektrornagnitnogo izluchenija na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 89–96.

11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh stuktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdeystvija storonnogo jelektrornagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 96–103.

12. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodeystvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdeystvija storonnogo jelektrornagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 103–111.

Посмунула (received) 13.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Випромінювання поверхневих полярітонів модульованим потоком заряджених частинок / В.І. Кравченко, В.С. Бреславець, В.В. Князев, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 56-61. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Излучение поверхностных поляритонов модулированным потоком заряженных частиц / В.И. Кравченко, В.С. Бреславец, В.В. Князев, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 56-61. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Radiation of surface polaritons by a modulated flow of charged particles / V.I. Kravchenko, V.S. Breslavets, V.V. Knyazev, I.V. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 56-61. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, директор НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: kw47@mail.ua

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: kw47@mail.ua

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33, e-mail: kw47@mail.ua

Бреславець Віталій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Системи інформації» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Князев Володимир Володимирович – провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. : (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua

Князев Владимир Владимирович – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua

Knyaziev Volodymyr Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior staff scientist, principal scientist, NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua

Яковенко Ігор Володимирович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри «Системи інформації» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physico-Matematic Sciences, Professor, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, В.С. БРЕСЛАВЕЦ, В.В. КНЯЗЕВ, И.В. ЯКОВЕНКО**ИЗЛУЧЕНИЕ НАВЕДЕННЫХ ТОКОВ С НЕОДНОРОДНЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ НА ГРАНИЦЕ**

В роботі досліджувався вплив потенційного бар'єра на спектральну густину енергії перехідного випромінювання об'ємних та поверхневих хвиль зарядженою частинкою, що рухається по нормалі до межі розподілу середовищ з різними діелектричними проникностями. Було отримано вирази для спектральних характеристик інтенсивностей випромінювання електромагнітних хвиль для різних типів потенційних бар'єрів: прямокутна потенційна стінка, бар'єр скінченної ширини та δ -подібний бар'єр. Визначено, що поле випромінювання складається із трьох складових: перша обумовлена зміною діелектричної проникності та існує без потенційного бар'єра, друга пов'язана із зміною швидкості частинки без урахування відбиття частинок від межі, третя складова визначає долю випромінювання, що пов'язана з хвилею де-Бройля, відбитої від межі.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, нестійкість, генерування, випромінювання, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

В работе исследовалось влияние потенциального барьера на спектральную плотность энергии переходного излучения объемных и поверхностных волн заряженной частицей, которая движется по нормали к границе раздела сред с различными диэлектрическими проницаемостями. Было получено выражения для спектральных характеристик интенсивностей излучения электромагнитных волн для различных типов потенциальных барьеров: прямоугольная потенциальная стенка, барьер конечной ширины и δ -подобный барьер. Определено, что поле излучения состоит из трех составляющих: первая обусловлена изменением диэлектрической проницаемости и существует без потенциального барьера, вторая связана с изменением скорости частицы без учета отражения частиц от границы, третья составляющая определяет долю излучения, связанную с волной де-Бройля, отраженной от границы.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, неустойчивость, генерация, излучение, заряженные частицы, поверхностные волны.

The effect of a potential barrier on the spectral energy density of the transition radiation of bulk and surface waves by a charged particle, which moves along the normal to the interface between media with different dielectric permittivities, was investigated. Expressions were obtained for the spectral characteristics of the radiation intensities of electromagnetic waves for various types of potential barriers: a rectangular potential wall, a barrier of finite width, and a δ -similar barrier. It is determined that the radiation field consists of three components: the first is due to a change in the dielectric constant and exists without a potential barrier, the second is associated with a change in particle velocity without taking into account the reflection of particles from the boundary, the third component determines the fraction of radiation associated with the de Broglie wave reflected from the boundary.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor, instability, generation, radiation, charged particles, surface waves.

Введение

Обычно качестве объекта исследований возможных механизмов генерации и усиления электромагнитных колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. выступают ограниченные твердотельные структуры, используемые в современной радиоэлектронике.

Вместе с тем, задачи преобразования энергии источников электромагнитного излучения (токов, наведенных внешним электромагнитным полем) в колебания среды в открытых излучающих структурах приобретают другой аспект. Речь идет о влиянии свойств поверхности на законы дисперсии и спектральную плотность излучения. В настоящей работе исследуется влияние свойств поверхности полуграниченных твердых тел на процессы преобразования поступательного движения заряженных частиц в энергию электромагнитных колебаний в рамках теории переходного излучения, т.е. в более широком частотном диапазоне. Кроме того, установлена степень влияния периодических неровностей границы вакуум – проводник на спектр электромагнитных колебаний и механизмы их возбуждения потоком заряженных частиц, движущихся по нормали к границе. В работе получено выражение

для спектральной плотности энергии переходного излучения потока частиц и определены структуры полей при наличии потенциального барьера на границе раздела сред.

Основные результаты

Обычно при исследовании спектральных характеристик переходного излучения не принимается во внимание присутствие потенциального барьера на границе сред [1]. Между тем, роль его оказывается весьма существенной. В данном параграфе исследуются особенности переходного излучения электромагнитных волн частицей с учетом влияния потенциального барьера U на границе двух сред.

Пусть в среде 1 (например, в вакууме, $z < 0$) равномерно и прямолинейно со скоростью v_1 движется заряженная частица вдоль нормали (ось z) к поверхности раздела сред. Предполагается, что $U(z)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} U(z) &= 0 & \text{при } -\infty < z < 0; \\ U(z) &= U_0 & \text{при } z \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

и высота стенки U_0 меньше кинетической энергии частицы в вакууме $E = \frac{m_0 v_1^2}{2}$. Тогда скорость частицы в среде 2 ($z \geq 0$) равна:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(E - U_0)}{m}}; \quad \vec{v}_2 \parallel z. \quad (2)$$

Коэффициент отражения F частицы от барьера определяется из уравнения Шредингера и граничных условий:

$$F = \left(\frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2} \right)^2. \quad (3)$$

В среде 1 ток создается частицей, движущейся по направлению к стенке и отраженной от нее

$$\vec{j}_1 = e\vec{v}_1\delta(\vec{p})[\delta(z - v_1t) - F\delta(z + v_1t)], \quad (4)$$

а ток в среде 2 – частицей, прошедшей над барьером:

$$\vec{j}_2 = De\vec{v}_1\delta(\vec{p})\delta(z - v_2t). \quad (5)$$

Здесь $D = 1 - F$ – коэффициент прохождения частицы над барьером, \vec{p} – вектор в плоскости раздела сред.

Электромагнитное поле в каждой из сред определяется из уравнений Максвелла, в которых ток заряженных частиц задан выражениями (4) или (5). Граничными условиями являются условия непрерывности тангенциальных компонент электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей на плоскости раздела сред $z = 0$ и условия излучения при $z = \pm\infty$. Из-за аксиальной симметрии уравнений Максвелла в изотропной среде с током вдоль оси z удобно ввести цилиндрическую систему координат ρ, φ, z , в которой независимо распространяются ТМ (H_φ, E_ρ, E_z) и ТЕ (E_φ, H_ρ, H_z) моды. Заряженной частицей, движущейся вдоль оси z , возбуждаются только ТМ волны. Зависимости компонент поля этой волны от времени представляет в виде разложения в интегралы Фурье, а их зависимости от координаты ρ – через интегралы Фурье-Бесселя:

$$E_z(\rho, z, \omega) = \int_0^\infty kE_z(z, k)J_0(k\rho)dk; \quad (6)$$

$$E_\rho(\rho, z, \omega) = \int_0^\infty E_\rho(z, k)J_1(k\rho)dk, \quad (7)$$

$J_n(k\rho)$ – функция Бесселя n -го порядка. Связь магнитного H_φ и электрического E_ρ полей определяется уравнением

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = \frac{i\omega c}{\varepsilon_i} E_\rho, \quad (8)$$

$i = 1, 2$ – номер среды, ε_i – диэлектрическая проницаемость i среды. Дельта-функцию $\delta(\vec{p})$ можно записать через функцию Бесселя:

$$\delta(\vec{p}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty kJ_0(k\rho)dk. \quad (9)$$

В результате получим, что компоненты электрического и магнитного полей имеют вид:

$$E_z^{(i)} = \int_0^\infty dk k J_0(k\rho) \{ A^{(i)} \exp(-i\lambda_i z) + B^{(i)} \exp(i\lambda_i z) + \frac{ie}{\pi\omega} (1 - \beta_i^2 \varepsilon_i) f_i [C^{(i)} \exp(i\frac{\omega}{v_i} z) + D^{(i)} \exp(-i\frac{\omega}{v_i} z)] \}; \quad (10)$$

$$H_\varphi^{(i)} = -i\frac{\omega}{c} \varepsilon_i \int_0^\infty dk J_1(k\rho) \{ A^{(i)} \exp(-i\lambda_i z) + B^{(i)} \exp(i\lambda_i z) - \quad (11)$$

$$- \frac{iek^2 v_i^2}{\pi\omega^3} f_i [C^{(i)} \exp(i\frac{\omega}{v_i} z) + D^{(i)} \exp(-i\frac{\omega}{v_i} z)] \}.$$

Выражение для компоненты поля $E_\rho^{(i)}$ легко получить из формул (8) и (11). В (10) и (11) введены следующие обозначения: коэффициенты $A^{(i)}, B^{(i)}, C^{(i)}, D^{(i)}$ в средах 1 и 2 соответственно равны:

$$A^{(1)} = A(k), \quad B^{(1)} = 0, \quad C^{(1)} = 1, \quad D^{(1)} = -F; \quad (12)$$

$$A^{(2)} = 0, \quad B^{(2)} = B(k), \quad C^{(2)} = \frac{v_1}{v_2} (1 - F), \quad D^{(2)} = 0.$$

$$\lambda_i = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_i - k^2} \quad (\text{Re } \lambda_i > 0); \quad (13)$$

$$f_i = \frac{1}{\varepsilon_i \left(\beta_i^2 \varepsilon_i - \frac{k^2 v_i^2}{\omega^2} - 1 \right)}; \quad \beta_i = \frac{v_i}{c}. \quad (14)$$

Коэффициенты $A(k)$ и $B(k)$ в выражениях находятся из граничных условий на поверхности раздела сред $z = 0$. Они определяют поле переходного излучения. При этом коэффициент $A(k)$ соответствует волне, распространяющейся в направлении $z < 0$, а $B(k)$ – в направлении $z > 0$. Нас интересует поле излучения в среде, которое описывается первыми слагаемыми в формулах (10) и (11).

$$A(k) = \frac{iek^2 v_1}{\pi\omega^2 \Delta(\omega, k)} \{ (f_1 - f_2) \varepsilon_2 - \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_2 - k^2} (f_1 \varepsilon_1 v_1 + f_2 \varepsilon_2 v_2) + \quad (15)$$

$$+ F \left[(f_1 + f_2) \varepsilon_2 + \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_2 - k^2} (f_1 \varepsilon_1 v_1 - f_2 \varepsilon_2 v_2) \right] \}.$$

Здесь

$$\Delta(\omega, k) = \varepsilon_2 \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_1 - k^2} + \varepsilon_1 \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_2 - k^2}. \quad (16)$$

Заметим: что в выражении (15) слагаемое, пропорциональное коэффициенту F , возникает из-за отражения частицы от потенциального барьера (1).

Рассмотрим среды с разными значениями диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{1,2}(\omega) > 0$. Поле излучения в среду 1 получим, используя метод стационарной фазы. Это излучение представляет собой сферическую волну, у которой компоненты поля равны

$$E_\rho(\omega) = E(\omega) \cos\Theta; \quad E(\omega) = E(\omega) \sin\Theta; \quad (17)$$

$$E(\omega) = \frac{e\beta_1 \cos\Theta \sin\Theta}{\pi[\varepsilon_2 \cos\Theta + \sqrt{\varepsilon_1(\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \Theta)}]} \times$$

$$\exp\left(i\frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_1} R\right) \times \frac{1}{R}$$

$$\times \left\{ \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)(1 + \beta_1 \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \Theta} - \varepsilon_1 \beta_1^2)}{(1 - \varepsilon_1 \beta_1^2 \cos^2 \Theta)(1 + \beta_1 \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \Theta})} + \frac{\varepsilon_1(\beta_2 - \beta_1)\sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \Theta}}{(1 + \beta_1 \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \Theta})(1 + \beta_2 \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \Theta})} + F \left(\frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_1 \beta_1 \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \Theta}}{1 - \varepsilon_1 \beta_1^2 \cos^2 \Theta} + \frac{\varepsilon_1}{1 + \beta_2 \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \Theta}} \right) \right\}$$

Здесь введены угол Θ и расстояние R от точки контакта частицы с границей раздела сред, $z = 0$, до точки наблюдения излучения в среде 1 таким образом, что $\vec{R} = \vec{\rho} \sin \Theta - \vec{i} z \cos \Theta$ (\vec{i} – орт в направлении оси z); предполагается, что выполнено условие $\frac{\omega}{c} R \gg 1$.

Поток энергии излучения (17) в элемент телесного угла $d\Omega = \sin \Theta d\Theta d\varphi$ нетрудно вычислить по формуле

$$\frac{d^2W}{d\Omega d\omega} = cR^2 |E(\omega)|^2. \quad (18)$$

Из выражения (17) видно, что поле излучения состоит из трех частей. Первая – представляет собой излучение, обусловленное скачком диэлектрических проницаемостей на границе и существующее в отсутствие потенциального барьера ($U_0 = 0$). Вторая часть описывает излучение, вызванное скачком скоростей на границе ($U_0 \neq 0$) без учета отражения электрона от потенциального барьера. Третье слагаемое определяет долю излучения, связанную с распространением волны де-Бройля, «отраженной» от границы.

В случае бесконечно высокого барьера ($U \rightarrow \infty, F = 1$) получим:

$$E(\omega) = \frac{2e\varepsilon_2\beta_1 \cos \Theta \sin \Theta}{\pi[\varepsilon_2 \cos \Theta + \sqrt{\varepsilon_1(\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \Theta)}]} \times \frac{1}{1 - \varepsilon_1 \beta_1^2 \cos^2 \Theta} \frac{\exp\left(i \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_1} R\right)}{R}. \quad (19)$$

Выражение для поля излучения в отсутствие потенциального барьера ($U_0 = 0$) известно. Заметим, что в этом случае ($U_0 = 0$) амплитуда поля и энергия излучения меньше, чем при наличии бесконечно высокого потенциального барьера ($U_0 \rightarrow \infty$). Например, если среда 2 представляет собой идеальный проводник ($\varepsilon_2 \rightarrow \infty$), то поле $E(\omega)$ в два раза меньше, чем поле излучения частицы в присутствии бесконечно высокого потенциала, а величина потока энергии отличается в 4 раза.

Предположим, что частица движется в полупроводнике с $p - n$ переходом, у которого дно зоны проводимости можно описать с помощью потенциального барьера в виде (1) (U_0 – конечная величина). Так как диэлектрическая проницаемость определяется только свойствами кристаллической решетки, то в формулах (17) и (18) нужно положить $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$. Поле излучения в таком полупроводнике имеет вид:

$$E(\omega) = \frac{e \sin \Theta}{2\pi c(1 + \beta_2 \sqrt{\varepsilon} \cos \Theta)} \times \frac{\exp\left(i \frac{\omega}{c} R\right)}{R} \left[\frac{(\beta_2 - \beta_1)\sqrt{\varepsilon} \cos \Theta}{1 + \beta_1 \sqrt{\varepsilon} \cos \Theta} + F \frac{2 + (\beta_2 - \beta_1)\sqrt{\varepsilon} \cos \Theta}{1 - \beta_1 \sqrt{\varepsilon} \cos \Theta} \right]. \quad (20)$$

Из выражения (20) видно, что угловое распределение интенсивности меняется, и в отличие от классического случая ($U_0 = 0$, а $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$) диаграмма направленности излучения «прижимается» к плоскости $z = 0$.

Следует отметить, что в общем случае (17) угловое распределение поля $E(\omega)$ характеризуется наличием острого максимума, возникающего в окрестности углов Θ , для которых выполнено условие эффекта Вавилова Черенкова в среде 1:

$$\cos^2 \Theta = \frac{1}{\varepsilon_1 \beta_1^2}.$$

(Здесь речь идет о максимуме, а не о сингулярной особенности, так как в реальных условиях необходимо учитывать затухание волны в среде). Эта особенность присутствует как в первом слагаемом (она связана с отражением от границы $z = 0$ черенковского излучения, обусловленного частицей, движущейся в положительном направлении оси z), так и в третьем члене (черенковское излучение в той же среде, вызванное частицей, отраженной от барьера). В полупроводнике с $p - n$ переходом максимум в распределении поля $E(\Theta)$ определяется только излучением Вавилова-Черенкова отраженной от границы частицы.

Как известно, на границе раздела сред могут распространяться поверхностные волны, если диэлектрическая проницаемость одной из сред отрицательная величина. Предположим, что $\varepsilon_2 < 0$ и $|\varepsilon_2| > \varepsilon_1$. В этом случае функция $\Delta(\omega, k)$ (16) обращается в нуль при значениях

$$k = k_p = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_1 |\varepsilon_2|}{|\varepsilon_2| - \varepsilon_1}}. \quad (21)$$

Выражение (21) является дисперсионным соотношением поверхностного поляритона. Вклад от полюса (21) описывает поле переходного излучения поверхностной цилиндрической волны:

$$E_z(\omega) = E \exp(-|k_p| \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{|\varepsilon_2|}} z) \sqrt{\frac{|k_p|}{p}} \exp(ik_p p); \quad (22)$$

$$E_p(\omega) = i \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{|\varepsilon_2|}} E_z(\omega); \quad H_\varphi(\omega) = -\sqrt{\frac{\varepsilon_1(|\varepsilon_2| - \varepsilon_1)}{|\varepsilon_2|}} E_z(\omega);$$

$$E = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{e\beta_1}{c} \frac{|\varepsilon_2|^{5/2} \varepsilon_1^{3/2}}{(|\varepsilon_2| - \varepsilon_1 + \beta_1^2 \varepsilon_1^2)(|\varepsilon_2| - \varepsilon_1 + \beta_2^2 \varepsilon_2^2)(\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2)} \times \exp\left(i \frac{\pi}{4}\right) \times \left\{ (1 + F) \left[\frac{|\varepsilon_2| - \varepsilon_1 + \beta_2^2 \varepsilon_2^2}{\varepsilon_1} + i\beta_2 \frac{|\varepsilon_2| - \varepsilon_1 + \beta_1^2 \varepsilon_1^2}{\sqrt{|\varepsilon_2| - \varepsilon_1}} \right] + \right.$$

$$\times \exp\left(\frac{\pi}{4}\right) \times \left\{ (1+F) \left[\frac{|\varepsilon_2| - \varepsilon_1 + \beta_2^2 \varepsilon_2^2}{\varepsilon_1} + i\beta_2 \frac{|\varepsilon_2| - \varepsilon_1 + \beta_1^2 \varepsilon_1^2}{\sqrt{|\varepsilon_2| - \varepsilon_1}} \right] + (1-F) \left[\frac{|\varepsilon_2| - \varepsilon_1 + \beta_1^2 \varepsilon_1^2}{|\varepsilon_2|} + i\beta_1 \frac{|\varepsilon_2| - \varepsilon_1 + \beta_2^2 \varepsilon_2^2}{\sqrt{|\varepsilon_2| - \varepsilon_1}} \right] \right\}$$

Этот результат относится к случаю, когда полюс k_p и точка стационарной фазы $k_s = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_1} \sin \Theta$ расположены достаточно далеко друг от друга, так что их вклады в интегралы (10) и (11) можно рассматривать независимо.

Поток энергии волны (22) через круговую площадку $(p, p + dp)$ при $z = 0$ равен

$$\frac{\partial^2 W}{\partial p \partial \omega} = 2\pi\omega \frac{\varepsilon_1^{3/2}}{|\varepsilon_2|^{1/2}} |E|^2. \quad (23)$$

Энергия цилиндрической волны в отсутствие потенциального барьера ($U_0 = 0; F = 0$) в $\frac{4\varepsilon_2^2}{(|\varepsilon_2| + \varepsilon_1)^2}$ раз меньше ее энергии в случае зеркально отражающей границы ($U_0 \rightarrow \infty; F = 1$).

Таким образом, поле излучения в среде 1 формируется в объемную сферическую и поверхностную цилиндрическую волны. Формирование сферической волны происходит на больших расстояниях от точки контакта частицы с границей раздела сред ($R \gg \frac{c}{\omega\sqrt{\varepsilon_1}}$, что следует из условия применимости

метода стационарной фазы) и ее интенсивность распределена в области углов $0 < \Theta < \pi/2$. Цилиндрическая волна распространяется вдоль поверхности раздела сред ($\Theta = \pi/2$) и затухает на глубине

$$L \sim \frac{c}{\omega\sqrt{\varepsilon_1}} \sqrt{\frac{|\varepsilon_2| - \varepsilon_1}{\varepsilon_1}}.$$

В области частот ω и углов Θ (близких к $\pi/2$), удовлетворяющих условиям

$$|\pi/2 - \Theta| < 2 \sqrt{\frac{2c}{R\omega\sqrt{\varepsilon_1}}} \ll 1, \quad |\varepsilon_2| \gg \varepsilon_1. \quad (24)$$

расстояние между полюсом и точкой стационарной фазы становится меньше ширины линий особенностей подынтегральных функций в (10) и (11). Тогда при вычислении интегралов (10) и (11) следует использовать метод Ван дер Вардена. Мы не приводим выражения для поля излучения из-за их громоздкости. Заметим, что поверхностная цилиндрическая и объемная сферическая волны существуют с области углов (24), но амплитуды их малы в силу этого неравенства.

Далее исследуем излучение движущейся заряженной частицы в однородной среде с потенциальным барьером в виде прямоугольника или δ -функции. Такой потенциал может возникнуть, например, в полупроводниковой среде из-за наличия примеси или дефекта. Коэффициент отражения частицы в этом случае можно представить следующим образом:

$$F = \frac{\phi(E, U_0)}{1 + \phi(E, U_0)}. \quad (25)$$

где вид функции $\phi(E, U_0)$ определяется формой потенциала $U(z)$. В случае прямоугольного потенциального барьера с шириной a :

$$U(z) = \begin{cases} 0 & z < 0; \\ U_0 & 0 < z < a; \\ 0 & a < z, \end{cases} \quad (26)$$

функция $\phi(E, U_0)$ равна:

$$\phi = \frac{U_0^2}{4E(U_0 - E)} \operatorname{sh}^2 \frac{a}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)} \quad (U_0 > E); \quad (27)$$

$$\phi = \frac{U_0^2}{4E(E - U_0)} \sin^2 \frac{a}{\hbar} \sqrt{2m(E - U_0)} \quad (E > U_0). \quad (28)$$

Если потенциал принимает форму δ -функции, т.е. $U(z) = V_0 \delta(z)$,

$$(29)$$

то

$$\phi = \frac{mV_0^2}{2E\hbar^2}. \quad (30)$$

Это выражение для ϕ можно получить из формулы (7.57), если $U_0 \gg E$ и $\frac{a\sqrt{2mU_0}}{\hbar} \ll 1$, где $V_0 = U_0 a$.

Поле излучения частицы является сферической волной и в области $z < 0$ описывается выражениями (17) и (18), если в них положить $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$, $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, а коэффициент отражения $F = F(E, U_0)$ найти из формул (25) – (30):

$$E(\omega) = \frac{e\beta \sin \Theta}{\pi c} F \frac{\exp\left(i \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon} R\right)}{R}. \quad (31)$$

Если $E > U_0$, то

$$\frac{d^2 W}{d\Theta d\omega} = \frac{e^2 \beta^2 U_0^4 \sin^3 \Theta}{8E^2 (E - U_0)^2} \sin^4 \frac{a}{\hbar} \sqrt{2m(E - U_0)}. \quad (32)$$

Плотность излучения осциллирует, обращаясь в нуль при условии $\frac{a}{\hbar} p = \pi n$ ($p = \sqrt{2m(E - U_0)}$), когда на ширине барьера укладывается целое число полуволн де-Бройля $\lambda_D = \frac{2\pi\hbar}{p}$. В этом случае имеется некоторая аналогия с переходным излучением частицы, проходящей через тонкую изотропную диэлектрическую пластину, когда имеют место осцилляции в результате изменения соотношения между толщиной пластины и длиной волны заряда $\lambda_e = \frac{2\pi v}{\omega}$.

Заметим, что рассмотренный эффект может быть использован в спектроскопии твердых тел.

Выводы

1 Определены особенности излучения заряженных частиц, пересекающих границу раздела сред с

различными диэлектрическими свойствами, связанными с наличием потенциального барьера.

2 Получено выражение для спектральной плотности энергии переходного излучения и показано, что поле излучения состоит из трех частей: первая обусловлена скачком диэлектрической проницаемости и существует без потенциального барьера, вторая связана с изменением скорости частицы без учета отражения частиц от границы, третья слагаемое представляет долю излучения, определяемую волной де-Бройля, отраженной от границы.

3 Получено выражения для плотности излучения частицы, движущейся в полупроводнике с p - n -переходом, дно зоны проводимости которого представляет собой потенциальный барьер, и в однородной среде с потенциальным барьером в виде δ -функции. Плотность излучения осциллирует, обращаясь в нуль когда на ширине барьера укладывается целое число полуволн де-Бройля $\lambda_D = \frac{2\pi\hbar}{p}$. В этом случае меха-

низм излучения аналогичен переходному излучению частицы, проходящей через тонкую изотропную диэлектрическую пластину, когда имеют место осцилляции в результате изменения соотношения между толщиной пластины и длиной волны заряда $\lambda_e = \frac{2\pi v}{\omega}$.

Список литературы:

1. Белецкий Н.Н. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / Н.Н. Белецкий, В.М. Светличный, Д.Д. Халамейда, В.М. Яковенко. – Киев.: Наукова думка, 1991. – 216 с.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
3. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с.
4. Стил М. Взаимодействие волн в плазме твердого тела / М. Стил, Б. Вюраль. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с.
5. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / Л.О. Мырова, А.З. Чепижченко. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с.
6. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплектов электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, В.И. Яковенко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 11. – С. 62–69.
7. Кравченко В.И. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 154–161.
8. Кравченко В.И. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 161–169.
9. Кравченко В.И. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектов электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. –

С. 83–89.

10. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89–96.

11. Кравченко В.И. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103.

12. Кравченко В.И. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 103–111.

References (transliterated):

1. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jeletromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. Kiev: Naukova dumka. 1991. 216 p.
2. Zi S. Fizika poluprovodnikovyh priborov. Moscow: Mir. 1984. 456 p.
3. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Jeletromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz'. 1979. 225 p.
4. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p.
5. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jeletromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 p.
6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jeletromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jeletroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. pp. 62–69.
7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jeletromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 154–161.
8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jeletromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jeletromagnitnogo vozdejstvija. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 161–169.
9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhenykh chastic. Navedennogo vneshnim jeletromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jeletroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 83–89.
10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jeletromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 89–96.
11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh stuktur jeletroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 96–103.
12. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kinetichekije mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 103–111.

Поступила (received) 03.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Випромінювання наведених струмів з неоднорідним потенціалом на межі / В.І. Кравченко, В.С. Бреславець, В.В. Князев, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 62-67. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Излучение наведенных токов с неоднородным потенциалом на границе / В.И. Кравченко, В.С. Бреславец, В.В. Князев, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 62-67. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Radiation of induced currents with inhomogeneous potential of the border / V.I. Kravchenko, V.S. Breslavets, V.V. Knyazev, I.V. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 62-67. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, директор НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: kw47@mail.ua

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: kw47@mail.ua

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33, e-mail: kw47@mail.ua

Бреславець Віталій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Системи інформації» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Князев Володимир Володимирович – провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. : (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua

Князев Владимир Владимирович – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua

Knyaziev Volodymyr Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior staff scientist, principal scientist, NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua

Яковенко Ігор Володимирович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри «Системи інформації» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physico-Matematic Sciences, Professor, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, В.С. БРЕСЛАВЕЦ, В.В. КНЯЗЕВ, И.В. ЯКОВЕНКО

ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ТОКОВ, НАВЕДЕННЫХ ВНЕШНИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ, НА НЕОДНОРОДНЫХ ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА СРЕД

Встановлено, що наявність малого просторова періодична нерівностей на кордоні вакууму – ідеальний провідник призводить до резонансного взаємодії просторових гармонік, що поширюються уздовж поверхні, що зумовлює появу смуги непропускання коливань. Для частоти, що лежить нижче смуги непропускання електромагнітних коливання носить поверхневий характер. В роботі визначено закон дисперсії такого роду коливань і кінетичні механізми їх збудження електронним потоком, які перетинають кордон розділу середовищ. Отримано кінетичне рівняння, що визначає зміна числа поверхневих коливань, наведено вираз для інкремента.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, кінетичні нестійкості, потенційний бар'єр, потік заряджених частинок, генерація, черенковское і перехідне випромінювання, поверхневі хвилі, що проводить тверде тіло, енергія випромінювання.

Установлено, что наличие малых пространственных периодических неровностей на границе вакуум – идеальный проводник приводит к резонансному взаимодействию пространственных гармоник, распространяющихся вдоль поверхности, что обуславливает появление полосы непропускания колебаний. Для частот, лежащих ниже полосы непропускания электромагнитные колебания носят поверхностный характер. В работе определен закон дисперсии такого рода колебаний и кинетические механизмы их возбуждения электронным потоком, пересекающим границу раздела сред. Получено кинетическое уравнение,

определяющее изменение числа поверхностных колебаний, приведено выражение для инкремента.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, кинетические неустойчивости, потенциальный барьер, поток заряженных частиц, генерация, черенковское и переходное излучение, поверхностные волны, проводящее твердое тело, энергия излучения.

The mechanisms of the influence of the surface properties of the leading solids on the spectral characteristics of the transition radiation were investigated. The processes of transition radiation of charged particles moving along the normal to the boundary of a periodically inhomogeneous surface of an ideal conductor were considered. The purpose of the study was to determine the law of dispersion of electromagnetic oscillations of such a system and the conditions for their excitation, when the size of surface irregularities is much shorter than the period. The problem was solved by the method of successive approximations with respect to a small parameter. From the condition that the tangential component of the electric field at the boundary of the conductor equals zero, a dispersion relation was obtained for three spatial harmonics of the electromagnetic field.

The solution of the dispersion equation determined the band of non-penetration of vibrations, the region of existence of surface and volume oscillations. The law of dispersion of surface electromagnetic waves is determined and the energy losses of a charged particle are found for their excitation. Due to the use of the expression for energy losses, the probabilities of electronic transitions of polaritons are determined and a kinetic equation for oscillations of this kind is obtained. Its solution allows one to find the increment of instability of surface polaritons under conditions when the monoenergetic electron flux moves along the normal to an ideally conducting surface with regular irregularities.

Under resonance conditions, when the length of the half-wave coincides with the lattice period, the increment reaches its maximum values. This mechanism can be used to generate electromagnetic waves of the submillimeter range approximations.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor superlattices, collisionless extinction, kinetic and hydrodynamic instability, generation, cherenkov and transition radiation, helicon, charged particles, surface waves.

Введение. Традиционно процессы переходного излучения рассматривались как возможный механизм генерации и усиления электромагнитных колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. При этом в качестве объекта исследований выступали ограниченные твердотельные структуры, используемые в современной радиоэлектронике. Вместе с тем, задачи преобразования энергии источников электромагнитного излучения (токов, наведенных внешним электромагнитным полем) в колебания среды в открытых излучающих структурах приобретают другой аспект. Речь идет о влиянии свойств поверхности на законы дисперсии и спектральную плотность излучения. В частности, возможность изменения пространственных и электромагнитных характеристик границы раздела сред находит свое применение в акустооптике для управления оптическим излучением [1] и в пьезоэлектронике для взаимного преобразования энергии электромагнитных и звуковых колебаний [2]. В настоящей работе исследуется влияние свойств поверхности полугограниченных твердых тел на процессы преобразования поступательного движения заряженных частиц в энергию электромагнитных колебаний в рамках теории переходного излучения, т.е. в более широком частотном диапазоне

Основные результаты. Пусть частица с зарядом e , движущаяся со скоростью v_0 вдоль оси y из бесконечно удаленной области $y \rightarrow -\infty$, в момент времени $t = 0$ пересекает границу раздела вакуум - идеальный проводник. Относительно границы раздела сред предполагается, что она меняется по гармоническому закону

$$y = \xi(t) = \xi_0 \sin qx,$$

где ξ_0 - высота неровностей, $q = 2\pi/d$ - волновое число, характеризующее их период d . Область $y \leq \xi(y)$ занимает вакуум, $y > \xi(y)$ - идеальный проводник. В направлении осей x и y система предполагается безграничной.

Предполагается далее, что потери энергии части-

цы в единицу времени настолько малы по сравнению с ее кинетической энергией, что скорость частицы можно считать неизменной. Тогда электромагнитное поле, создаваемое частицей, описывается уравнениями Максвелла следующего вида:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \quad \text{div } \vec{E} = 4\pi e \delta(\vec{r} - \vec{v}_0 t); \quad (1)$$

$$\text{rot } \vec{H} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} e v_0 \delta(\vec{r} - \vec{v}_0 t); \quad \text{div } \vec{H} = 0.$$

Решение неоднородной системы уравнений представим в виде разложения в трехкратные интегралы Фурье:

$$\vec{E}^i(\vec{r}, t) = \int \vec{E}(\vec{q}) e^{i(\vec{q}\vec{r} - \omega t)} d\vec{q}_\perp d\omega \quad (2)$$

и т.д., где

$$\vec{E}(\vec{q}) = \frac{ie}{2\pi^2 v_0} \frac{(\omega \vec{v}_0 - c^2 \vec{q})}{q^2 c^2 - \omega^2},$$

$$\vec{q} = \left(\vec{q}_\perp, \frac{\omega}{v_0} \right); \quad \vec{q}_\perp = (q_x, q_z).$$

Эти выражения описывают поля в безграничной среде (вакууме). Для нахождения полей, возбуждаемых частицей при взаимодействии с границей, к выражениям (1) необходимо добавить решения однородных уравнений Максвелла с произвольными константами, которые находятся из условий равенства нулю тангенциальных составляющих электрического поля на границе. Решение однородной системы уравнений подставим в виде набора пространственных гармоник

$$E_{1x}^h = \int \sum A_n \exp i(\vec{q}_n \vec{r} - \omega t) d\vec{q}_\perp d\omega; \quad (3)$$

$$E_{1z}^h = \int q_z \sum \frac{A_n}{q_{xn}} \exp i(\vec{q}_n \vec{r} - \omega t) d\vec{q}_\perp d\omega;$$

$$E_{1y}^h = -\int \sum \frac{q_z^2 + q_{xn}^2}{q_{xn} q_{yn}} A_n \exp i(\vec{q}_n \vec{r} - \omega t) d\vec{q}_\perp d\omega; \quad (4)$$

$$E_{2x}^h = \int \sum B_n \exp i(\vec{q}_n \vec{r} - \omega t) d\vec{q}_\perp d\omega;$$

$$E_{2z}^h = - \int \sum \frac{q_{xn}}{q_z} B_n \exp i(\vec{q}_n \vec{r} - \omega t) d\vec{q}_\perp d\omega,$$

где:

$$\vec{q}_n = (q_{xn}, q_{yn}, q_z), \quad q_{xn} = q_x + nq;$$

$$q_{yn} = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2 - q_{xn}^2 - q_z^2}}; \quad \text{Im} q_{yn} < 0.$$

Граничные условия на поверхности принимают вид:

$$[\vec{E}\vec{N}]_z = 0; \quad E_z|_{y=\xi(x)} = 0, \quad (5)$$

где \vec{N} – вектор нормали к поверхности $y = \xi(x)$.

$$N_x = - \frac{\partial \xi}{\partial x} \left[1 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 \right]^{-1/2};$$

$$N_y = \left[1 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 \right]^{-1/2}; \quad N_z = 0. \quad (6)$$

Для малых неровностей $q\xi_0 \ll 1$ граничные условия (5) можно перенести на поверхность $y = 0$, разложив поля в ряд по $\xi(x) = \xi_0 \sin qx$. Удерживая при этом величины первого порядка малости, получим из условий (5) и (6) следующую бесконечную систему алгебраических уравнений [4]:

$$\sum (A_n + B_n) e^{inqx} + \frac{\xi_0 q}{2} \sum (a_n A_n + \frac{q_{yn}}{q} B_n) e^{i(n+1)qx} -$$

$$- \frac{\xi_0 q}{2} \sum (b_n A_n + \frac{q_{yn}}{q} B_n) e^{i(n-1)qx} + E_x(\vec{q}) +$$

$$+ i\xi_0 q \left[\frac{\omega}{qv_0} E_x(q) \sin qx + E_y(q) \cos qx \right] = 0;$$

$$\sum \left(\frac{q_z}{q_{xn}} A_n - \frac{q_{xn}}{q_z} B_n \right) e^{inqx} + E_z(\vec{q}) = 0, \quad (8)$$

где $a_n = \begin{cases} \frac{q_{yn}}{q} \mp \frac{q_{\perp n}^2}{q_{xn} q_{yn}}; & q_{\perp n}^2 = q_z^2 + q_{xn}^2. \end{cases}$

Поскольку $q\xi_0 \ll 1$, можно ограничиться рассмотрением трех гармоник: $n = -1, 0, 1$. В этом случае система уравнений (7), (8) приобретает следующий вид:

$$A_0 + B_0 + \frac{\xi_0 q}{2} \left(a_{-1} A_{-1} + \frac{q_{y-1}}{q} B_{-1} \right) -$$

$$- \frac{\xi_0 q}{2} \left(b_1 A_1 + \frac{q_{y1}}{q} B_1 \right) + E_x(q) = 0;$$

$$A_1 + B_1 + \frac{\xi_0 q}{2} \left(a_0 A_0 + \frac{q_{y0}}{q} B_0 \right) +$$

$$+ \frac{i\xi_0 q}{2} \left[\frac{\omega}{qv_0} E_x(q) + E_x(q) \right] = 0;$$

$$A_{-1} + B_{-1} - \frac{\xi_0 q}{2} \left(b_0 A_0 + \frac{q_{y0}}{q} B_0 \right) +$$

$$+ \frac{i\xi_0 q}{2} \left[E_y(q) - \frac{\omega}{qv_0} E_x(q) \right] = 0; \quad (9)$$

$$B_0 = \frac{q_z^2 A_0}{q_x^2} - \frac{q_z}{q_x} E_z(q); \quad B_1 = \frac{q_z^2}{q_{x1}^2} A_1; \quad B_{-1} = \frac{q_z^2}{q_{x-1}^2} A_{-1}.$$

В результате ее решения находим:

$$A_0 = \frac{q_x}{q_\perp^2 \Delta} [q_z E_z(\vec{q}) - q_x E_x(\vec{q})]; \quad (10)$$

$$\Delta = 1 + \left(\frac{\xi_0 q}{2} \right)^2 \frac{q_x^2}{q_\perp^2} \left[\frac{q_{x-1}^2}{q_{\perp-1}^2} a_{-1} b_0 + \frac{q_{x1}^2}{q_{\perp1}^2} a_0 b_1 \right]; \quad (11)$$

$$A_1 = - \frac{\xi_0 q}{2} \frac{q_x^2}{q_\perp^2} a_0 A_0; \quad A_{-1} = - \frac{\xi_0 q}{2} \frac{q_x^2}{q_\perp^2} b_0 A_0.$$

При этом поле нулевой гармоники приобретает вид:

$$E_y^h(\vec{r}, t) = \int \frac{d\vec{q}_\perp d\omega}{q_{y0} \Delta} [q_x E_x(\vec{q}) - q_z E_z(\vec{q})] \exp i(\vec{q}_0 \vec{r} - \omega t). \quad (12)$$

Перейдем к рассмотрению наиболее интересных и важных частных случаев. Заменяем интегрирование в формуле (12) по dq_x и dq_z суммированием по q_x и q_z , ($q_x = \frac{2\pi l_x}{L_x}$, $q_z = \frac{2\pi l_z}{L_z}$, l_x, l_z – целые числа, L_x и L_z – размеры системы соответственно в направлениях x и z) и ограничимся исследованием случая $q_z = 0$.

Тогда

$$E_y^h(\vec{r}, t) = \sum_{q_x, q_x} E_y^h(q_z, q_x, y, t), \quad (13)$$

$$E_y^h(q_x, q_z = 0, x, y, t) = - \frac{2ieq_x^2}{Sv_0} \times$$

$$\times \int \frac{d\omega \exp i(q_x x + q_{y0} y - \omega t)}{[q_x^2 v_0^2 + \omega^2 (1 - \beta^2)] D(\omega, q_x)}; \quad (14)$$

$$\beta^2 = \frac{v_0^2}{c^2}, \quad S = L_x L_z; \quad D(\omega, q_x) = q_{y0} \Delta,$$

$$\Delta = 1 + \frac{\xi_0^2}{4q_{y0}} \left\{ \frac{q_{y-1}^2 - q(q_x - q)}{q_{y-1}} (q_{y0}^2 + qq_x) + \right.$$

$$\left. \frac{q_{y1}^2 - q(q_x + q)}{q_{y1}} (q_{y0}^2 + qq_x) \right\}. \quad (15)$$

Очевидно, что вклад в интеграл (7.15) дадут корни уравнения $D(\omega, q_x) = 0$, определяющие спектр собственных электромагнитных колебаний данной системы. Решение этого уравнения ищем методом последовательных приближений по параметру $q\xi_0 \ll 1$. Если $\xi_0 \rightarrow \infty$, получаем $q_{y0} = 0$, т.е. $\omega_0 = \pm cq_x$. (Здесь и далее полагаем $q_x > 0$). Наличие неровностей приводит к возбуждению на частоте ω_0 пространственных гармоник с $n = -1, 1$ и изменению частоты ω_0 в результате взаимодействия между ними

$$\delta q_{y0} = \frac{\xi_0^2 q_x^2 q^{3/2}}{4} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2q_x - q}} - \frac{i}{\sqrt{2q_x + q}} \right\}; \quad (16)$$

$$\text{Im} \delta q_{y0} < 0.$$

В области $q_x < q/2$ величина δq_{y0} как и величины поперечных волновых векторов сопутствующих гар-

моник $q_{y_1}(\omega_0)$ и $q_{y_{-1}}(\omega_0)$ являются чисто мнимыми. Это приводит к образованию так называемой истинно поверхностной волны с законом дисперсии:

$$\omega_S = cq_x \left[1 - \frac{\xi_0^4 q_x^2 q^3}{32} \left(\frac{1}{\sqrt{q-2q_x}} + \frac{1}{\sqrt{q+2q_x}} \right)^2 \right]. \quad (17)$$

В области $q_x < q/2$ на частоте $\omega_0 = cq_x$ поперечное волновое число $q_{y_{-1}}(\omega_0)$ становится действительным, т.е. гармоника $n = -1$ «отрывается» от поверхности. В этом случае δq_{y_0} – комплексная величина и волна становится псевдоповерхностной. Ее закон дисперсии имеет вид:

$$\omega_y = cq_x \left[1 + \frac{\xi_0^4 q_x^2 q^3}{32} \left(\frac{1}{\sqrt{2q_x - q}} - \frac{i}{\sqrt{2q_x + q}} \right)^2 \right]. \quad (18)$$

Анализируя выражение для поля $E_y^h(q_x, y, \omega_{-1})$ гармоники с $n = -1$ на частоте $\omega_{-1} = -c(q_x - q)$, легко убедиться, что в области $0 < q_x < q/2$ волна является объемной, а при $q/2 < q_x < q$ – поверхностной. В точке $q_x = q/2$ (условие резонанса) частоты и волновые числа гармоник с $n = -1$ и $n = 0$ совпадают. В этом случае связь между гармониками максимальна и в результате взаимодействия гармоник, распространяющихся в противоположных направлениях, образуются связанные волны

$$\delta q_{y_{-1}} \delta q_{y_0} = -\frac{\xi_0^2 q^4}{16}. \quad (19)$$

Отсюда получаем:

$$\omega_{sr} = \frac{cq}{2} \left(1 - \frac{\xi_0^2 q^2}{8} \right). \quad (20)$$

При $\text{Im } \delta q_{y_0} = \text{Im } \delta q_{y_{-1}} < 0$;

$$\text{Re } \delta q_{y_0} = \text{Re } \delta q_{y_{-1}} = 0; \quad \omega_{vr} = \frac{cq}{2} \left(1 + \frac{\xi_0^2 q^2}{8} \right); \quad (21)$$

при $\text{Re } \delta q_{y_0} = \text{Re } \delta q_{y_{-1}} < 0$; $\text{Im } \delta q_{y_0} = \text{Im } \delta q_{y_{-1}} = 0$.

Таким образом, в точке резонанса, также как и во всем интервале волновых чисел $0 < q_x < q$, существуют поверхностная и объемная волны. При этом разность между частотами минимальна и равна $\Delta\omega = \omega_{vr} - \omega_{sr} = cq^3 \xi_0^2 / 8$. Иными словами, $\Delta\omega$ определяет ширину запрещенной полосы частот, разделяющей области существования поверхностных и объемных волн. Действительно, вблизи резонанса

$$q_x = q/2 + \delta q_x; \quad \omega = \omega_{Sz} + \Delta\omega/2,$$

волновые числа δq_{y_0} и $\delta q_{y_{-1}}$ различаются и из выражения (19) следует

$$\left(\frac{\Delta\omega}{2c} \right)^2 - (\delta q_x)^2 = \left(\frac{\xi_0^2 q^3}{16} \right)^2. \quad (22)$$

Видно, что при $\Delta\omega < c \frac{\xi_0^2 q^3}{8}$ существует полоса непропускания волн, поскольку в этом случае δq_x –

мнимая величина. Естественно, аналогичные явления происходят и при взаимодействии гармоник с $n = 0$ и $n = -1$ в области отрицательных частот, когда $\omega_0 = -cq_x$, $\omega_{-1} = c(q_x - q)$.

Найдем теперь амплитуду поверхностной волны, принимая во внимание полюса в выражении (13). В общем виде его можно представить следующим образом:

$$E_y^h = \frac{8\pi e q_x^2 v_0 \exp i[q_x x + q_{y_0}(\omega_s) y]}{S[q_x^2 v_0^2 + \omega_0^2 (1 - \beta^2)] D'(\omega_s)} \sin \omega_0 t. \quad (23)$$

Здесь $D'(\omega_s) = \left. \frac{\partial D(\omega)}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_s}$. При этом принято во

внимание:

$$q_{y_0}(-\omega_s) = q_{y_0}(\omega_s); \quad D(\omega_s) = D(-\omega_s);$$

$$D'(-\omega_s) = -D'(\omega_s).$$

В условиях резонанса $\omega_0 = -cq/2$, $1/D'(\omega_s) = -i\xi_0 qc/4$ и выражение (23) при $\beta^2 \ll 1$ принимает очень простой вид:

$$E_y^h = \frac{2i\pi e \xi_0 q v_0}{Sc} \exp i \left(q_x x - \frac{i\xi_0 q^2}{16} y \right) \sin \omega_0 t. \quad (24)$$

Потери заряда на возбуждение поверхностных колебаний за время его пролета пространства взаимодействия $L = 16/\xi_0 q^2$ равны:

$$\Delta W_q = ev_0 \int_{-\infty}^0 E_y^h(x=0, y=v_0 t) dt = -\frac{4\pi e^2 v_0}{Sc} \xi_0. \quad (25)$$

Принимая во внимание, что время пролета частицы τ через всю систему равно $\tau = L/v_0$, находим среднюю величину потерь энергии частицы в единицу времени:

$$\frac{dW_q}{dt} = \frac{\Delta W_q}{\tau} = -\frac{4\pi e^2 v_0^3 \xi_0}{Vc^2}, \quad V = LS. \quad (26)$$

Эту величину (с противоположным знаком) можно рассматривать как спонтанное излучение поверхностных фотонов в единицу времени

$$\hbar\omega_0 \frac{\partial N_q}{\partial t} = -\frac{dW_q}{dt}, \quad (27)$$

где N_q – число фотонов с энергией $\hbar\omega_0$. С другой стороны, для N_q можно составить кинетическое уравнение следующего вида:

$$\frac{\partial N_q}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{kk'} |H_{kqk'}|^2 \delta(E_k - E_{k'} - \hbar\omega_0) \times \\ \times \left[(N_q + 1) \rho_k^0 (1 - \rho_{k'}^0) - N_q \rho_{k'}^0 (1 - \rho_k^0) \right], \quad (28)$$

где $H_{kqk'}$ – матричный элемент гамильтониана взаимодействия электронов и поверхностных фотонов; ρ_k^0 – число электронов в состоянии \vec{k} , $E_k = \hbar^2 k^2 / 2m$ – энергия электрона с волновым вектором \vec{k} ; суммирование производится по волновым векторам \vec{k} и k'_y ; в направлении x и y выполняется закон сохранения импульсов: $k_x = k'_x - q_x$; $k_z = k'_z - q_z$. Из формулы (28) при $N_q \rightarrow \infty$, $\rho_k^0 = \delta_{kk_0}$, $\vec{k}_0 = (0, mv_0/\hbar, 0)$ получим:

$$\frac{\partial N_q}{\partial t} = \frac{L}{\hbar} \int_0^\infty |H_{k_0qk'}|^2 \delta(E_{k_0} - E_{k'} - \hbar\omega) dk'_y = \frac{L |H_{k_0qk'}|^2}{\hbar^2 v_0},$$

где $k' = k_- = \sqrt{k_0^2 - 2m\omega/\hbar} \approx k_0$ при $mv_0/2 \gg \hbar\omega_0$. Приравняв $-(1/\hbar\omega_0)(dW_d/dt)$ полученному выражению, находим величину матричного элемента

$$|H_{k_0qk'}| = \left(\frac{4\pi e^2 v_0^4 \xi_0 \hbar}{V L c^2 \omega_0} \right)^{1/2}. \quad (29)$$

Зная матричный элемент, можно из уравнения (28) найти при $N_q \gg 1$ инкремент неустойчивости поверхностных фотонов $\gamma = \frac{1}{2} N_q \frac{\partial N_q}{\partial t}$ в результате их взаимодействия с потоком заряженных частиц с $\rho_k^0 = (2\pi)^3 n_{0b} \delta(\vec{k} - \vec{k}_0)$, где n_{0b} – поверхностная плотность электронов

$$\frac{\partial N_q}{\partial t} = \frac{4 |H_{k_0qk'}|^2 L V n_{0b} \omega_0}{\hbar m v_0^3} N_q; \quad (30)$$

$$\gamma = 2 \frac{\omega_b^2 v_0 \xi_0}{c^2} \equiv \frac{\omega_b^2}{2\omega_0^2} q^2 v_0 \xi_0.$$

Здесь ω_b – ленгмюровская частота электронного пучка. Таким образом, при взаимодействии направленного потока электронов с поверхностными колебаниями на периодически неровной границе при условии $mv_0/2 > \hbar\omega_0 \gg T$ (T – температура электронов) процессы индуцированного излучения преобладают над процессами поглощения и колебания – становятся неустойчивыми. Этот механизм может быть использован для генерирования электромагнитных волн на частотах $\omega_0 \sim (10^{13} \div 10^{14}) \text{ с}^{-1}$ при $q \sim (10^4 \div 10^3) \text{ см}^{-1}$.

Выводы

1 Установлено, что наличие малых пространственных периодических неровностей на границе вакуум – идеальный проводник приводит к резонансному взаимодействию пространственных гармоник, распространяющихся вдоль поверхности, что обуславливает появление полосы непропускания колебаний.

2 Для частот, лежащих ниже полосы непропускания электромагнитные колебания носят поверхностный характер. В работе определен закон дисперсии такого рода колебаний и кинетические механизмы их возбуждения электронным потоком, пересекающим границу раздела сред.

3 Получено кинетическое уравнение, определяющее изменение числа поверхностных колебаний, приведено выражение для инкремента. Показано, что поверхностные колебания на периодически неровной границе идеального проводника становятся неустойчивыми за счет энергии переходного излучения в случае, когда электронная система является неравновесной.

Список литературы:

1. Белецкий Н.Н. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах /

Н.Н. Белецкий, В.М. Светличный, Д.Д. Халамейда, В.М. Яковенко. – Киев.: Наукова думка, 1991. – 216 с.

2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

3. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с.

4. Стил М. Взаимодействие волн в плазме твердого тела / М. Стил, Б. Вюраль. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с.

5. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с.

6. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплекующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 11. – С. 62–69.

7. Кравченко В.И. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 154–161.

8. Кравченко В.И. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 161–169.

9. Кравченко В.И. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплекующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83–89.

10. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89–96.

11. Кравченко В.И. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103.

12. Кравченко В.И. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 103–111.

References (transliterated)

1. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. Kiev: Naukova dumka. 1991. 216 p.

2. Zi S. Fizika poluprovodnikovyh priborov. Moscow: Mir. 1984. 456 p.

3. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Jelektromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz'. 1979. 225 p.

4. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p.

5. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 p.

6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo izluchenija

na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovoyh kompleksujushhijh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. pp. 62–69.

7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jelektromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 154–161.

8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnogo jelektromagnitnogo vozdejstvija. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 161–169.

9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vneshnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovoyh kompleksujushhijh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 83–89.

10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 89–96.

11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovoyh struktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 96–103.

12. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovoyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 103–111.

Поступила (received) 17.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Перехідне випромінювання струмів, наведених зовнішнім випромінюванням на неоднорідній межі поділу середовищ / В.І. Кравченко, В.С. Бреславець, В.В. Князев, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 67-72. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Переходное излучение токов, наведенных внешним излучением, на неоднородной границе раздела сред / В.И. Кравченко, В.С. Бреславец, В.В. Князев, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 67-72. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Transition radian of currents inducted by external radiation on inhomogeneous border of surroundings separation / V.I. Kravchenko, V.S. Breslavets, V.V. Knyazev, I.V. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 67-72. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, директор НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: kw47@mail.ua

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: kw47@mail.ua

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33, e-mail: kw47@mail.ua

Бреславець Віталій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Системи інформації» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Князев Володимир Володимирович – провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. : (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua

Князев Владимир Владимирович – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», тел.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua

Knyaziev Volodymyr Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior staff scientist, principal scientist, NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua

Яковенко Ігор Володимирович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри «Системи інформації» НТУ «ХПІ». тел. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physico-Matematic Sciences, Professor, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 537.528:621.763

Н. И. КУСКОВА, А. Н. КОРЗИНОВА, С. А. ХАЙНАЦКИЙ, А. Н. ЮЩИШИНА, Д. И. ЧЕЛПАНОВ**МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ**

Розглянуто питання утилізації відходів органічних розчинників, лакофарбових матеріалів і галогеновмісних органічних речовин. Досліджено розрядноімпульсні процеси двостадійної переробки рідких вуглецевмісних відходів, що включає переробку газів, що утворюються. Показана можливість переробки твердих галогеновмісних відходів в процесах самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС), що ініціюється розрядним імпульсом струму. Розрядноімпульсний і СВС методи утилізації вуглецевмісних відходів доцільно використовувати для отримання корисного продукту – вуглецевих наноматеріалів.

Ключові слова: вуглецевмісні відходи, лакофарбові матеріали, галогеновмісні речовини, що містять галогени, розрядноімпульсна обробка, самопоширюваний високотемпературний синтез, вуглецеві наноматеріали.

Рассмотрены вопросы утилизации отходов органических растворителей, лакокрасочных материалов и галогенсодержащих органических веществ. Исследованы разрядноимпульсные процессы двухстадийной переработки жидких углеродсодержащих отходов, включающей переработку образующихся газов. Показана возможность переработки твердых галогенсодержащих отходов в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), инициируемого разрядным импульсом тока. Разрядноимпульсный и СВС методы утилизации углеродсодержащих отходов целесообразно использовать для получения полезного продукта – углеродных наноматериалов.

Ключевые слова: углеродсодержащие отходы, лакокрасочные материалы, галогенсодержащие вещества, разрядноимпульсная обработка, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, углеродные наноматериалы.

The problems of recycling of waste products of organic solvents, paint and varnish materials and halogen-containing compounds organic were considered. Pulse discharge processes for two-stage treatment of liquid carbon-containing waste products which includes recycling of forming gases were studied. The possibility of recycling of solid halogen-containing waste products in the process of self-propagating high-temperature synthesis (SHS), initiated by the pulse discharge current was shown. Effective regimes for processing of liquid carbon-containing waste products into carbon nanomaterials were determined. Pulse discharge and SHS methods of recycling of carbon-containing waste products can and should be used in the expedient production of industrially useful carbon nanomaterials.

Keywords: carbon-containing waste products, paint and varnish materials, halogen-containing compounds, pulse discharge treatment, self-propagating high-temperature synthesis, carbon nanomaterials.

Введение. Актуальность предлагаемой тематики обусловлена чрезмерным увеличением в последние годы техногенных отходов, которые наносят непоправимый вред живой и неживой природе и ощутимо угрожают существованию планеты в целом. Несмотря на большое количество исследований в этой области, проблемы экологически чистого производства, а также переработки и утилизации промышленных отходов остаются актуальными.

Современная промышленность продолжает накапливать огромное количество отходов углеродсодержащих материалов, утилизация которых имеет целый ряд проблем и требует разработки специальных технологических процессов. В то же время, эти продукты могут служить исходным сырьем для получения углеродных наноматериалов. Разнообразие органических веществ, к сожалению, не позволяет разработать универсальный метод их переработки. Поэтому в качестве объекта данного исследования были выбраны два различных, с точки зрения химического строения, вида – отходы лакокрасочных материалов (ЛКМ) и отходы галогенсодержащих органических веществ [1,2].

Лакокрасочные материалы находят широкое применение в производстве и быту. Однако в результате их использования образуются отходы ЛКМ, немалая часть которых является токсичными как для людей, так и для природной среды. В зависимости от основного образующего компонента различают сле-

дующие виды ЛКМ – лаки, краски, эмали, шпаклевки и грунтовки. Высокая токсичность органических веществ, входящих в состав ЛКМ, обуславливает необходимость разработки методов их эффективной утилизации.

Растворитель – это химическое вещество или смесь химических веществ в виде жидкости, которая входит в состав ЛКМ и применяется для регулирования его вязкости, растворения пигмента и/или связывания частиц материала [1]. Растворители и ЛКМ содержат в своем составе сложные вещества, процесс естественного разложения которых в природе может идти несколько сотен лет, отравляя окружающую среду, к тому же они легко воспламеняются. Чаще всего их утилизация происходит в процессе сжигания в специальных печах при температуре от 300 до 800 °С. Однако этим способом не могут быть утилизированы ЛКМ и растворители, содержащие галогенсодержащие компоненты из-за образования диоксинов.

При этом отличительной особенностью утилизации ЛКМ является то, что различные виды ЛКМ перерабатываются в соответствии со специально разработанной технологией при соблюдении специфических условий. Указанные технологии утилизации ЛКМ не являются экологически чистыми, осуществляются не полностью и сопровождаются ущербом для окружающей среды. При размещении же этих отходов на полигонах, их негативное воздействие на окружающую

шую среду многократно возрастает. Поэтому особенно актуальной является проблема создания современных экологически безопасных методов и способов утилизации отходов органических растворителей и ЛКМ.

Процессы утилизации галогенсодержащих органических материалов сопровождаются образованием высокотоксичных продуктов, которые представляют серьезную угрозу для окружающей среды.

Еще одним классом опаснейших промышленных отходов, утилизация которых представляет серьезную проблему, являются полихлорзамещенные бифенилы (ПХБ). Их производство началось в 1929 г. и продолжалось до 1970 г., пока не был установлен кумулятивный механизм их токсического действия. Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях рекомендовала сократить применение этих материалов до 2025 г.

Основными потребителями ПХБ являются электротехническая промышленность (под маркой «совол» или «совтол» эти вещества использовались как диэлектрические жидкости в трансформаторах и силовых конденсаторах) и сельское хозяйство (пестициды). Это указывает на крупнотоннажность данного вида отходов. Из 800 тыс. т ПХБ, произведенных с 1929 г., около 300 тыс. т к настоящему времени находятся в окружающей среде; а около 400 тыс. т – в пользовании. Часть этого используемого количества ПХБ попадает в окружающую среду. Поскольку ПХБ разрушаются очень медленно, уровни их содержания в окружающей среде снижаются крайне незначительно.

Особенностью данного вида органических соединений являются такие свойства, как высокие термо- и огнестойкость, которые обеспечили их широкое применение. Неконтролируемое сгорание ПХБ в результате аварий на трансформаторах или конденсаторах приводит к образованию высокотоксичных полихлордибензодиоксинов и полихлордибензофуранов.

Реагентный метод утилизации ПХБ является одним из наиболее изученных. Его особенностью является использование щелочных и других активных металлов, связывающих атомы хлора, с добавлением углеводородов (типа гексана, циклогексана). При этом образуются различные органические продукты, включая высокомолекулярные. Существенным недостатком данного метода является его высокая стоимость и опасность проведения процесса.

Электрохимический метод характеризуется невысокой конверсией ПХБ и не имеет широкого практического применения.

Практически стопроцентная утилизация ПХБ достигается в пиролизических методах за счет использования дополнительных реагентов в роли катализаторов.

Интенсивно исследуются методы радиационного и фотохимического дехлорирования. Особое внимание уделяется изучению гидрогенолиза (взаимодействие ПХБ с водородом, замещение хлора на атомы водорода в присутствии дорогостоящих катализаторов (Cu, Fe, Co, Ni, W и др.)).

Сложность утилизации хлорорганических пестицидов, таких как гексахлорбензол, состоит в том, что их галогензамещенные ароматические кольца высокоустойчивы к окислительной деградации, а возможное образование еще более опасных побочных продуктов представляет собой один из основных недостатков технологий, используемых в традиционных мусоросжигательных печах. Их утилизация может быть реализована как разрядноимпульсным методом, так и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [3].

Процессы утилизации фторопластов и материалов, их содержащих, сопровождаются образованием высокотоксичных продуктов, таких как карбонилдифторид, перфторизобутилен, фтористый водород. Получение таких и других смесей ксенобиотиков представляет серьезную угрозу для окружающей среды, что существенно затрудняет расширение их применения в современных технологиях.

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений переработки фторопластов и материалов, их содержащих, считается регулируемая термодеструкция в специальных условиях, конечной целью которой является, как правило, либо преимущественное получение низкомолекулярного тонкодисперсного фторопласта, либо различных газообразных продуктов, в частности мономеров. Существенным недостатком известных способов переработки фторопласта является образование значительного количества сложных смесей газообразных веществ, требующих дополнительного обезвреживания.

Анализ предварительных исследований и литературы. Разрядноимпульсная или высокотемпературная обработка некоторых классов органических соединений могут обеспечить не только утилизацию вредных веществ, но и синтез углеродных наноматериалов (УНМ). Синтез УНМ в процессе переработки органических растворителей различной природы (спирт, керосин, бензол, гексан, циклогесан и др.) является хорошо изученным и управляемым процессом [4]. Однако использование чистых растворителей с экономической точки зрения не представляется достаточно разумным. Отходы данных веществ содержат большое количество углерода, поэтому задачей их утилизации является не просто захоронение (уничтожение), а использование их в качестве сырья для получения наноуглерода.

Одним из таких методов может стать разрядноимпульсный метод деструкции углеродсодержащих жидкостей с последующим получением углеродных наноматериалов, предложенный нами [5] и активно развивающийся в последние годы [6,7]. Для полной и безопасной утилизации растворителей и ЛКМ этот метод был существенно усовершенствован, что позволяет перерабатывать выделяющийся при разложении обрабатываемых жидкостей газ (смесь газов – см. например, [8]).

В плазме электрического разряда молекулы газообразных углеводородов распадаются на углерод и водород. Таким образом, если последовательно вклю-

чить в схему переработки жидких отходов в качестве второй стадии переработку газов, то выброс в атмосферу вредных веществ можно уменьшить до приемлемых размеров или свести к нулю.

В качестве второй стадии переработки жидких органических отходов – стадии переработки газовой фазы – возможно также использовать и другие известные методы получения углеродных наноматериалов из газовой фазы. К примеру, термическое разложение газов при недостатке воздуха – пиролиз [2], или высокочастотный разряд в газе [9].

В целях наиболее полной утилизации органических растворителей на второй стадии обработки можно использовать одновременно (последовательно) сразу несколько методов деструкции молекул органических соединений с последующим получением УНМ. При этом выход УНМ по массе должен увеличиться, а состав получаемых материалов стать более разнообразным, поскольку в процессе разложения молекул исходного продукта образуется большое количество газов, которые содержат главным образом предельные и непредельные углеводороды с разным типом углеродных связей в молекулах.

Цель работы – разработка разрядноимпульсных и СВЧ методов переработки промышленных углеродсодержащих отходов (органических растворителей, галогенсодержащих органических веществ, ЛКМ), включающей синтез углеродных наноматериалов.

Методика исследований. Для реализации непрерывного синтеза УНМ при двухстадийной разрядноимпульсной переработке органических отходов были разработаны и запатентованы новые разрядноимпульсные методы и установки [10-13].

Для исследования двухстадийных процессов синтеза УНМ создан экспериментальный стенд. Первая стадия – переработка органических отходов. На второй стадии обработка смеси углеводородных газов, выделяющихся на первой стадии, – проводилась с помощью воздействия искрового разряда, импульсного тлеющего разряда субмикросекундной длительности и каталитического пиролиза. На второй стадии переработки использовали лабораторные установки с различными комбинациями этих методов синтеза УНМ.

Экспериментальный стенд создавался как установка непрерывного электроразрядного синтеза УНМ на базе ВТМ 12-40. В зарядной цепи высокое напряжение (до 50 кВ) подавалось на два накопителя емкостью $C1 = 0,25$ мкФ и $C2 = 0,1$ мкФ через зарядные сопротивления $R1 = 0,2$ мОм и $R2 = 0,6$ мОм. С накопителей напряжение коммутировалось на искровые промежутки в двух металлических разрядных камерах (РК1 и РК2) цилиндрической формы диаметром 70 мм.

Схема технологического узла стенда приведена на рис. 1.

Технологический узел включает в себя напорный бак (НБ), в верхней части которого находится устройство разделения обработанной жидкости на газ и жидкость; РК1 – разрядная камера для обработки углерод-

содержащей жидкости; РК2 – разрядная камера для обработки углеродсодержащих газов, образовавшихся в процессе электроразрядной обработки жидких углеводородов; фильтровально-разделительное устройство для сепарации твердых частиц, образовавшихся в процессе ЭРО газов в РК2; пиролитический реактор (ПР) для дополнительной обработки смеси углеродсодержащих газов.

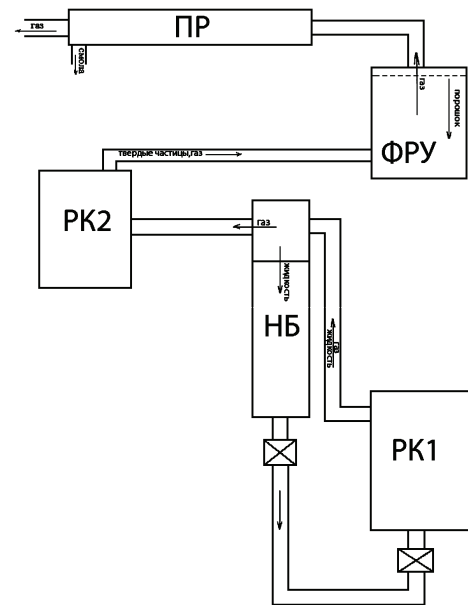


Рисунок 1 – Схема технологического узла экспериментального стенда для двухстадийной переработки жидких углеродсодержащих отходов

Катодом в них служил корпус камеры, анод исполнялся в виде металлического диска толщиной от 2 до 4 мм, расположенного симметрично по оси камеры примерно в нижней ее части. Межэлектродный промежуток составлял от 2 до 5 мм. Первая камера (РК1) предназначалась для обработки жидкости. Объем камеры (с учетом объема электродной системы) $V1 = 450$ см³. Рабочая жидкость подавалась в камеру снизу из напорного бака (НБ), расположенного выше разрядной камеры. В этот же бак по патрубку, установленному на крышке камеры, поступала и смесь газов, получаемая в процессе электроразрядной обработки жидкости.

Часть газа конденсировалась на поверхности рабочей жидкости и поступала на вторичную обработку. Остальной газ подавался на обработку искровым разрядом во вторую камеру (РК2). Коммутатор, подающий высокое напряжение на вторую камеру, оборудовался изолирующей вставкой в искровом промежутке, механически удалявшейся в случае необходимости. Это позволяло осуществлять задержку начала обработки смеси газов на время, необходимое для заполнения газом второй камеры. Обработанный газ поступал в сосуд Вульфа, в качестве которого используется фильтро-разделительное устройство (ФРУ), где часть полученных УНМ (тяжелая фракция) оседала. Далее газ поступал на фильтрующие устройства (механические фильтры) и, в случае необходимости – на устройство для каталитического пиролиза газа.

Частоту следования импульсов в камере РК1 варьировали от 1 до 5 Гц. При подключении второй камеры частота следования импульсов удваивалась и становилась одинаковой в обеих камерах.

Лабораторная установка для реализации процессов СВС имеет в основе следующий принцип работы – подготовленную из порошковых реагентов шихту (спрессованную до определенной плотности или помещенную в капсулу, внутренний диаметр которой может быть от 3 до 30 мм и больше) располагали в специальной ячейке, после чего к торцу образца подвели иницирующую спираль (вольфрамовую проволоку, предварительно закрепленную в токоведущих электродах).

Иницирование процесса СВС реализовано кратковременным локальным нагревом экзотермических смесей разрядным импульсом тока, текущего по проводнику [14,15].

Результаты эксперимента. Проведен комплекс исследований физико-химических процессов синтеза УНМ в результате переработки жидких отходов органических растворителей (при напряжениях от 30 до 50 кВ с частотой следования импульсов от 1 до 20 Гц) и смеси образующихся при этом газов (с частотой следования импульсов от 10 до 25 Гц и от 1 до 10 кГц).

Показано, что эффективность двухстадийной разрядноимпульсной переработки отходов органических растворителей на УНМ и водород возрастает от 3 до 10 раз, по сравнению с одностадийной.

Определены эффективные режимы переработки отходов в проточном режиме (непрерывная подача жидкости со скоростью от 1 до 3 дм³/с, напряжение от 30 до 50 кВ, частота следования импульсов от 4 до 15 Гц при запасаемой в одном импульсе энергии от 0,1 до 0,2 кДж) и смеси образующихся при этом газов (напряжение от 30 до 40 кВ, частота следования импульсов от 10 до 25 Гц при запасаемой в одном импульсе энергии от 0,05 до 0,1 кДж).

С целью изучения возможности реализации электроразрядного способа утилизации отходов ЛКМ осуществляли переработку пленок эмали ПФ-115, погруженных в растворитель (уайт-спирит или керосин). Соотношение твердой и жидкой фаз по массе составляло 3:1. Электроразрядную обработку отходов реализовали при напряжении 35 кВ и частоте следования импульсов – 10 Гц.

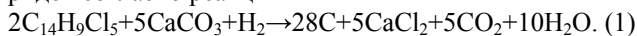
Полное диспергирование эмалевых пленок достигается после 20000 импульсов. При этом в результате частичной деструкции органических компонентов обрабатываемой смеси цвет продукта становится черным.

Полнота переработки отходов ЛКМ достигалась использованием двухстадийной установки, в которой производили разрядноимпульсную обработку жидкости и образующихся газов. Полученные наноматериалы представляют собой углеродсодержащие аморфные наноматериалы, которые могут быть использованы в строительной промышленности.

Исследован разрядноимпульсный процесс пере-

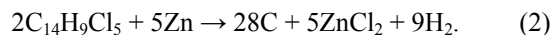
работки ПХБ, в качестве которого использован ДДТ (C₁₄H₉Cl₅) (широко известный в быту как дуст). Данная препаративная форма имеет следующий состав: действующее вещество от 1 до 10 %, наполнители – каолин, тальк, мел, титановые белила.

В эксперименте суспензию дуста в циклогексаноне или этиловом спирте в соотношении Т:Ж=1:20 подвергали электроразрядной обработке при напряжении 34 кВ и частоте следования импульсов от 7 до 15 Гц. Наличие солей карбонатной кислоты в суспензии способствует образованию соответствующих хлоридов согласно реакции



Источником атомарного или молекулярного водорода в данной реакции являются как молекулы обрабатываемого вещества ДДТ, так и продукты электроразрядной деструкции углеводородного растворителя.

Во второй серии экспериментов разрядноимпульсной обработке подвергали фильтрат, содержащий растворимые хлорпроизводные. При этом в качестве галогеноотнимающего средства использовали гранулы металлического цинка. Процесс, по-видимому, протекает по механизму, близкому к реакции Вюрца

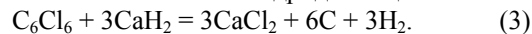


Данные варианты утилизации ПХБ приводят к образованию неорганических хлоридов, которые хорошо растворимы в воде и могут быть отделены от углеродных продуктов. На второй стадии производили переработку образующихся углеводородных газов на УНМ и водород.

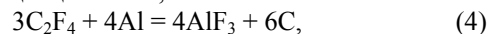
Показано, что для полной утилизации отходов органических растворителей, лакокрасочных материалов и полихлорзамещенных бифенилов необходима их двухстадийная ЭРО. Подобным образом могут быть переработаны любые жидкие или твердые растворимые в органических жидкостях углеродсодержащие отходы.

Исследованы также СВС-процессы переработки отходов твердых порошкообразных галогенсодержащих веществ - политетрафторэтилена и гексахлорбензола. Так как политетрафторэтилен и гексахлорбензол не могут самовоспламеняться, то для осуществления процесса СВС использовали вещества – горючие.

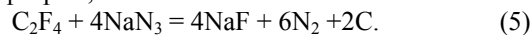
Для переработки гексахлорбензола в качестве восстановителя использовали гидрид кальция



Для переработки политетрафторэтилена были использованы алюминий, который имеет низкую температуру плавления, что позволяет реализовать стабильную инициацию СВС,



а так же азид натрия, который интенсивно взаимодействует с фтором,



Для выбранных реагентов (политетрафторэтилен, алюминий и азид натрия) рассчитаны энтальпия ΔH , энтропия ΔS и энергия Гиббса ΔG , а также адиабатическая температура горения T_a . Анализ результатов (см. табл. 1) показывает, что внутренней энергии рас-

смотренных экзотермических систем достаточно для синтеза углерода.

Таблица 1 – Результаты расчета энтальпии, энтропии, энергии Гиббса и адиабатической температуры горения экзотермических систем

СВС-система	ΔH , кДж/моль	ΔS , Дж/(моль·К)	ΔG , кДж/моль	Адиабатическая температура горения, T_g , К
$Al + (-C_2F_4)_n$	-3041,6	-4,721	-1634,74	3000
$NaN_3 + (-C_2F_4)_n$	-1393,2	-658,39	-1197	3200

Рентгенофазовый анализ образцов СВС-продукта систем «алюминий + политетрафторэтилен» и «азид натрия + политетрафторэтилен» показал, что исходные порошки вступили в СВС-реакцию с образованием углеродных наноматериалов.

Таким образом, СВС-процессы могут служить альтернативой традиционной термической переработке отходов галогенсодержащих веществ.

Выводы. Показано, что для полной утилизации отходов органических растворителей, лакокрасочных материалов и полихлорзамещенных бифенилов необходима их двухстадийная разрядноимпульсная обработка. Определены эффективные режимы переработки жидких углеродсодержащих отходов на углеродные наноматериалы.

Показана возможность применения экологически чистых СВС- процессов утилизации твердых галогенсодержащих отходов, инициируемых разрядными импульсами тока и происходящих одновременно с синтезом углеродных наноматериалов.

Список литературы:

1. Дринберг С. А. Растворители для лакокрасочных материалов / С. А. Дринберг. – Л.: Химия, Ленинградское отделение, 1986. – 194 с.
2. Мухина Т. Н. Пиролиз углеводородного сырья / Т. Н. Мухина, Н. Л. Барабанов, С. Е. Бабаиш. – М.: Химия, 1987. – 240 с.
3. Концепция развития СВС как области научно-технического прогресса / отв. ред. А. Г. Мерджанов. – Черноголовка: «Территория», 2003. – 368 с.
4. Rud A. D. Synthesis of Carbon Nanomaterials Using High-Voltage Electric Discharge Techniques / A. D. Rud, N. I. Kuskova, L. I. Ivaschuk, L. Z. Boguslavskii, A. E. Perekos // Nanomaterials. – InTech. – 2011. – P. 211-230.
5. Kuskova N. I. Obtaining nanocarbon using the electric-discharge treatment method of organic liquids / N. I. Kuskova, L. Z. Boguslavskii, A. A. Smal'ko // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2007. – № 4. – P. 46-52.
6. Kuskova N. I. Electrodischarge Technology and Equipment to Produce New Carbon Nanomaterials / N. I. Kuskova, K. V. Dubovenko, S. V. Petrichenko, P. L. Tsolin, S. O. Chaban // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2013. – V. 49, No 3. – P. 35-42.
7. Yushchishina A. N. On possible processes of the formation of carbon nanomaterials with electrodischarge treatment of hydrocarbons / A. N. Yushchishina, N. I. Kuskova, D. I. Chelpanov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2015. – Vol. 51, iss. 3. – P. 203-207.
8. Kuskova N. I. Synthesis of Carbon Nanomaterials from

Gases Generated in the Course of the Electrodischarge Treatment of Organic Liquids / N. I. Kuskova, V. Yu. Baklar', A. Yu. Terekhov, A. N. Yushchishina, S. V. Petrichenko, P. L. Tsolin, A. P. Malyushevskaya // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2014. – Vol. 50, No. 2. – P. 101-105.

9. Boguslavskii L. Z. On the Possibility of the Synthesis of Nanocarbon under the High Frequency Pulse Periodic Electrodischarge Effect on Gaseous Hydrocarbons / L. Z. Boguslavskii // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2010. – Vol. 46, № 4. – P. 352–360.

10. Кускова Н. І. Пат. 103278, Україна. Установа для одержання вуглецевих наноматеріалів / Н.І. Кускова, О.І. Вовченко, С.В. Петриченко, А.П. Малюшевська, П.Л. Цолін, В.Ю. Баклар, О.О. Зубенко. – 2012.

11. Цолін П. Л. Пат. 83143, Україна. Установа для одержання вуглецевих наноматеріалів / П.Л. Цолін, Н.І. Кускова, С. В. Петриченко, А. Ю. Терехов, О. О. Зубенко. – 2013.

12. Кускова Н. І. Пат. 80684, Україна. Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів з органічних рідин / Н.І. Кускова, О.І. Христо, А.Ю. Терехов, А. П. Малюшевська, О.О. Зубенко. – 2012.

13. Вовченко О. І. Пат. 100467, Україна. Спосіб переробки органічних розчинників або їх відходів / О.І. Вовченко, Н.І. Кускова, С.В. Петриченко, Л.З. Богуславський. – 2011.

14. Челпанов Д. І. Пат. 104443, Україна. Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів / Д.І. Челпанов, Н.І. Кускова, А.О. Смалько. – 2015.

15. Челпанов Д. І. Разрядноимпульсная инициация процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в некоторых порошковых системах / Д.И. Челпанов, Н. И. Кускова, А. А. Смалько // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. праць. – 2015. – № 51. – С. 115-120.

References (transliterated):

1. Drinberg S A., Barabanov N. L., Babash S. E. Rastvoriteli dlya lakokrasochnykh materialov [Solvents for paints and varnishes]. Leningrad, Khimiya, Leningradskoe otделение, 1986. 194 p.
2. Mukhina T. N. Piroлиз uglevododorodnogo syr'ya [Pyrolysis of hydrocarbon raw material]. M.: Khimiya, 1987. 240 p.
3. Merzhanov A. G., ed. Kontseptsiya razvitiya SVS kak oblasti nauchno-tekhnicheskogo progressa [The concept of development of SHS as a field of scientific and technological progress]. Chernogolovka, "Territoriya", 2003. 368 p.
4. Rud A.D., Kuskova N.I., Ivaschuk L.I., Boguslavskii L.Z., Perekos A.E. Synthesis of Carbon Nanomaterials Using High-Voltage Electric Discharge Techniques. Nanomaterials. InTech. 2011, pp. 211-230.
5. Kuskova N. I., Boguslavskii L. Z., Smal'ko A. A. Obtaining nanocarbon using the electric-discharge treatment method of organic liquids. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2007, no. 4, pp. 46-52.
6. Kuskova N. I., Dubovenko K. V., Petrichenko S. V., Tsolin P. L., Chaban S. O. Electrodischarge Technology and Equipment to Produce New Carbon Nanomaterials. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2013, vol. 49, no. 3, pp. 35-42.
7. Yushchishina A. N., Kuskova N. I., Chelpanov D. I. On possible processes of the formation of carbon nanomaterials with electrodischarge treatment of hydrocarbons. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2015, vol. 51, iss. 3, pp 203–207.
8. Kuskova N.I, Baklar' V.Yu., Terekhov A.Yu., Yushchishina A.N., Petrichenko S.V., Tsolin P.L., Malyushevskaya A.P. Synthesis of Carbon Nanomaterials from Gases Generated in the Course of the Electrodischarge Treatment of Organic Liquids.

Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2014, vol. 50, no. 2, pp. 101–105.

9. Boguslavski L. Z. On the Possibility of the Synthesis of Nanocarbon under the High Frequency Pulse Periodic Electrodischarge Effect on Gaseous Hydrocarbons. Surface Engineering and Electrochemistry. 2010, vol. 46, no. 4, pp. 352–360.

10. Kuskova N. I., Vovchenko O. I., Petrichenko S. V., Malyushevs'ka A. P., Tsolin P. L., Baklar V. Yu., Zubenko O. O. Ustanovka dlya oderzhannya vugletsevikh nanomaterialiv [Equipment for carbon nanomaterials production]. Patent UA, no. 103278, 2012.

11. Tsolin P. L., Kuskova N. I., Petrichenko S. V., Terekhov A. Yu., Zubenko O. O. Ustanovka dlya oderzhannya vugletsevikh nanomaterialiv [Equipment for carbon nanomaterials production]. Patent UA, no. 83143, 2013.

12. Kuskova N. I., Khristo O. I., Terekhov A. Yu., Malyushevs'ka A. P., Zubenko O. O. Sposib oderzhannya vugletsevikh nanomaterialiv z organichnikh ridin [Method of carbon nanoma-

terials production from organic liquids]. Patent UA, no. 80684, 2012.

13. Vovchenko O. I., Kuskova N. I., Petrichenko S. V., Boguslavskiy L. Z. Sposib pererobki organichnikh rozchinnikov abo ikh vidkhodiv [Method for processing of organic solvents or their wastes]. Patent UA, no. 100467, 2011.

14. Chelpanov D. I., Kuskova N. I., Smal'ko A. O. Sposib oderzhannya vugletsevikh nanomaterialiv [Method of carbon nanomaterials production]. Patent UA, no. 104443, 2016.

15. Chelpanov D. I., Kuskova N. I., Smal'ko A. A. Razryadnoimpul'snaya initsiatsiya protsessov samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza v nekotorykh poroshkovykh sistemakh [Pulse discharge initiation of self-propagating high-temperature synthesis processes in some powder systems]. Visnik NTU «KhPI». Ser. Tekhnika ta elektrofizika visokikh naprug: zb. nauk. prats'. 2015, no. 51, pp. 115–120.

Поступила (received) 10.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методи утилізації вуглецевмісних відходів / Н. І. Кускова, Г. М. Корзинова, С. О. Хайнацький, Г. М. Ющишина, Д. І. Челпанов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 73-78. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-0740.

Методы утилизации углеродсодержащих отходов / Н.И. Кускова, А.Н. Корзинова, С.А. Хайнацкий, А.Н. Ющишина, Д.И. Челпанов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 73-78. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-0740.

Methods of recycling of carbon-containing waste products / N.I. Kuskova, A.N. Korzinova, S.A. Khainatskiy, A.M. Yushishina, D.I. Chelpanov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 73-78. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кускова Наталія Іванівна – доктор технічних наук, професор, зав. відділу електрофізичних досліджень Інституту імпульсних процесів та технологій НАН України; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Кускова Наталья Ивановна – доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований Института импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Kuskova Natalya Ivanovna – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electrophysical Researches of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Корзинова Ганна Миколаївна – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (093) 227-17-93; e-mail: maluchek@i.ua.

Корзинова Анна Николаевна – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (093) 227-17-93; e-mail: maluchek@i.ua.

Korzinova Anna Nikolaevna – Postgraduate Student; Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (093) 227-17-93; e-mail: maluchek@i.ua.

Хайнацький Сергій Олександрович – науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України; тел.: (095) 664-90-70; e-mail: Khainatskyu@mail.ru.

Хайнацкий Сергей Александрович – научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (095) 664-90-70; e-mail: Khainatskyu@mail.ru.

Khainatskiy Sergey Aleksandrovich – Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (095) 664-90-70; e-mail: Khainatskyu@mail.ru.

Ющишина Ганна Миколаївна – кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України; тел.: (063) 437-87-85; email: defr@iipt.com.ua.

Ющишина Анна Николаевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (063) 437-87-85; email: defr@iipt.com.ua.

Yushishina Anna Nikolaevna – Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (063) 437-87-85; email: defr@iipt.com.ua.

Челпанов Дмитро Ілліч – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Челпанов Дмитрий Ильич – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Chelpanov Dmitry Ilych – Postgraduate Student; Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

УДК 537.52:542.9:661.66

Н. И. КУСКОВА, Д. И. ЧЕЛПАНОВ**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ**

Проведено експериментальні дослідження самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС) вуглецевих наноматеріалів (ВНМ) в порошках на основі «алюмінію + політетрафторетилену» з добавками вуглеводнів і каталізатора. Показано, що використання вуглеводнів перешкоджає окисленню СВС продуктів і збільшує вихід ВНМ. За отриманими дифрактограмами проведено оцінку розмірів наночастинок ВНМ. Отримано залежності питомих електричних провідностей ВНМ від густини за різного ступені компактування порошків.

Ключові слова: самопоширюваний високотемпературний синтез, вуглецеві наноматеріали, хімічний склад, фазовий склад, область когерентного розсіювання, питома електрична провідність.

Проведены экспериментальные исследования самовоспроизводящегося высокотемпературного синтеза (СВС) углеродных наноматериалов (УНМ) в порошках на основе «алюминия + политetraфторэтилена» с добавками углеводородов и катализатора. Показано, что использование углеводородов препятствует окислению СВС продуктов и увеличивает выход УНМ. По полученным дифрактограммам проведена оценка размеров наночастиц УНМ. Получены зависимости удельных электрических проводимостей УНМ от плотности при разной степени компактирования порошков.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, углеродные наноматериалы, химический состав, фазовый состав, область когерентного рассеивания, удельная электрическая проводимость.

Experimental studies of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) of carbon nanomaterials (CNM) in powders based on "aluminum + PTFE" with the addition of hydrocarbons (cyclohexane, paraffin wax) and catalyst (Fe) were conducted. It is shown that the use of hydrocarbons prevents oxidation of SHS products and increases the yield of CNM. Assessments of CNM nanoparticles sizes using obtained diffraction patterns were made. The size of CNM nanoparticles calculated using diffractograms equals to ~30 nm. The dependence of specific electrical conductivity of CNM on the density at different degrees of compaction of powders were obtained. Different values of electrical conductivity (0.01 S/m to 50 S/m) are due to the presence of powders in various carbon allotropic forms.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, carbon nanomaterials, chemical composition, phase composition, the region of coherent scattering, specific electrical conductivity.

Введение. Развитие промышленности требует новых подходов для создания технологий и материалов, в которых активно применяются такие наноконструктивные и новые углеродные материалы, как металлоуглеродные наноконструктивы и углеродный нанокристаллический материал (УНМ). Наноструктурированные модификации углерода, являясь достаточно новым и сравнительно недавно открытым классом веществ, находят все более широкое применение в различных направлениях химической промышленности, индустрии конструкционных и строительных материалов, системах обеспечения безопасности, электроники, медицины. Высокая востребованность углеродных наноматериалов обуславливается разнообразием физико-химических свойств, демонстрируемых ними, а также огромным потенциалом с точки зрения улучшения их потребительских характеристик.

Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) зарекомендовал себя как конкурентоспособный по сравнению с другими методами получения УНМ [1]. Исследование фазового состава и свойств полученных СВС-методом УНМ остается актуальной задачей.

Анализ предварительных исследований и литературы. В работах [2-5] авторы экспериментально исследовали условия формирования, закономерности и основные параметры волн горения в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза углеродных наноматериалов в различных порошковых

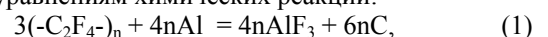
системах.

Проведен термодинамический анализ систем, которые содержат металлы, их оксиды, углеродсодержащие соединения (уротропин $C_6H_{12}N_4$, эйкозан $C_{20}H_{42}$, политetraфторэтилен $(-C_2F_4)_n$) и вещество-топливо (порошкообразный алюминий Al).

Расчеты термодинамических характеристик (энтальпии, энтропии и энергии Гиббса) проводили на основе закона Гесса. Анализ полученных результатов показал, что экзотермические реакции с политetraфторэтиленом протекают со значительным повышением энтальпии и энергии Гиббса. Поэтому использование политetraфторэтилена и других перфторированных углеводородов для СВ синтеза является термодинамически обоснованным и целесообразным.

Цель работы – исследование зависимости фазового состава СВС-продуктов, полученных при использовании политetraфторэтилена, от добавок углеводородов и катализатора.

Методика исследований. Образцы для реализации СВС готовили из смеси порошков с мольным отношением реагентов, соответствующим стехиометрическим уравнениям химических реакций:



Порошковые смеси засыпали в кварцевые или фторопластовые трубочки. Эксперименты проводили в нормальных условиях при атмосферном давлении.

Исследование влияния углеводородов и катализатора на фазовый состав синтезируемых наномате-

риалов проводили, добавляя в экзотермические смеси порошки металлов-катализаторов группы железа (5 мас. %) или углеводородов в разных агрегатных состояниях (парафин, циклогексан и др.) – от 10 до 20 мас. %.

Удаление непрореагировавших реагентов и побочных продуктов химических реакций из полученных порошков проводили растворением продуктов реакций в кислотах.

Рентгенофазовый и рентгеноспектральный анализ синтезированных углеродных и металлоуглеродных наноматериалов выполнен в Институте металлофизики НАН Украины.

Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) нанокристаллов синтезированных фаз определяли по формуле Шеррера [6]:

$$d = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos\left(\frac{2\theta}{2}\right)}, \quad (2)$$

где d – диаметр наночастицы, нм; β – ширина рентгеновского максимума на полувысоте, рад.; λ – длина волны рентгеновского излучения, нм; k – константа Шеррера, безразм.

После химической очистки порошки взвешивали на электронных весах и засыпали в загрузочный контейнер, который закрывали пружинно-поршневой системой [7]. Далее постепенно проводили сжатие образца с помощью пресса при изменении давления до 10^7 Па и постоянной температуре с одновременным измерением высоты пружины и расстояния между обкладками пресса. При сжатии происходило замыкание цепи между электродами, в роли которых выступали поршень и днище загрузочного контейнера, подключенные к мосту (МО-62). Измеряемое сопротивление скачком убывало ввиду увеличения общей площади контактов между соседними частичками порошка.

Плотность в зависимости от степени компактирования и электропроводность исследуемых порошков УНМ были определены по соответствующим формулам:

$$\rho = \frac{4m}{\pi D^2 h}, \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{4h}{R\pi D^2}, \quad (4)$$

где ρ – плотность порошка, кг/м³; m – масса порошка, кг; D – диаметр контейнера, м; h – высота столбика порошка, м; σ – удельная электрическая проводимость, См/м; R – сопротивление столбика порошка, Ом.

Результаты эксперимента. Сравнение химических составов исходной порошковой смеси «Al+(-C₂F₄)_n» (см. рис. 1) и синтезированных СВС продуктов (см. рис. 2), представленных в табл. 1 и 2, показало, что проведение СВС в кварцевой трубке в воздухе приводит к частичному окислению продуктов синтеза и появлению небольшого количества примесей кремния. Поэтому в дальнейшем порошковые смеси «Al+(-C₂F₄)_n» помещали в трубки из политетрафторэтилена, а сами трубки в процессе СВС находились в водной среде.

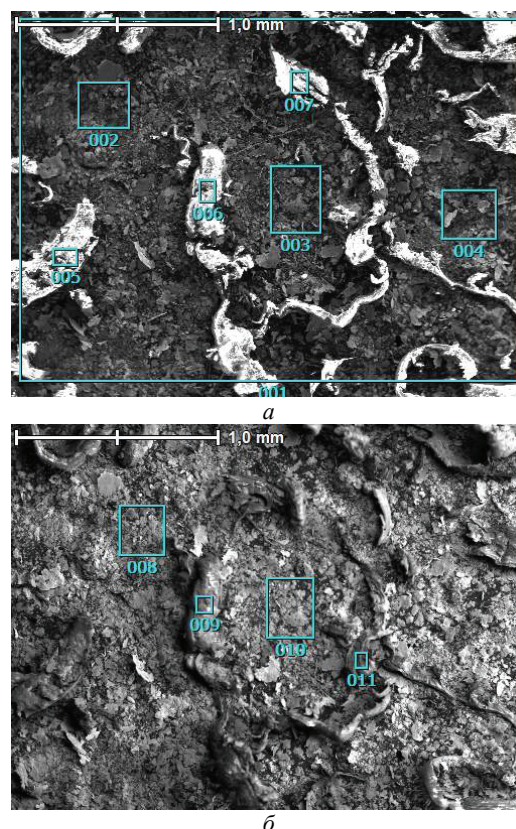


Рисунок 1 – Электронномикроскопические фотографии исходной смеси «Al+(-C₂F₄)_n»: а – х50, изображение SEI; б – х50, изображение BEI

Таблица 1 – Химический состав (мас. доля, %) выделенных на рис. 1 участков исходной порошковой смеси «Al+(-C₂F₄)_n»

Memo	C	O	F	Al	Total
1	21,89	1,4	14,54	62,17	100
2	20,54	5,13	0	74,33	100
3	25,94	4,88	0	69,17	100
4	19,54	4,77	0	75,69	100
5	18,91	0	59,48	21,61	100
6	19,02	0	62,88	18,1	100
7	18,64	0	62,68	18,67	100
8	20,63	2,96	2,83	73,58	100
9	17,31	0	61,29	21,4	100
10	24,37	4,16	0	71,47	100
11	19,67	0	62,41	17,92	100

Рентгенофазовый анализ образцов исходной смеси и СВС-продукта систем «алюминий + политетрафторэтилен» показал, что исходные порошки вступили в СВС-реакцию с образованием УНМ [5], однако содержание УНМ в СВС-продуктах меньше, чем побочных продуктов реакции (см. рис. 3). Поэтому проведено исследование возможности протекания СВ синтеза в указанной системе с добавлением жидких или твердых углеводородов. Добавление углеводородов, испарение которых происходит при температурах менее 400 К, способствует образованию инертной газовой среды для основных СВС реагентов, которая препятствует окислению продуктов.

Результаты проведения экспериментов показали, что СВ синтез в системах «алюминий + политетраф-

торэтилен + углеводород» реализуется при условии, что массовая доля углеводорода в исходной смеси не превышает 20 %, при этом выделяемого в экзотермической реакции исходной системы количества теплоты достаточно для дегидратации углеводородов и синтеза УНМ.

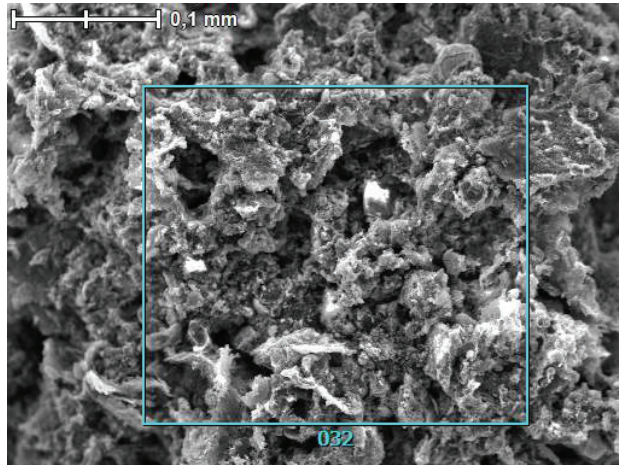


Рисунок 2 – Электронномикроскопические фотографии (x300, изображение SEI) СВС-продуктов системы «Al + (-C₂F₄)_n»

Таблица 2 – Химический состав (мас. доля, %) выделенных на рис. 2 участков СВС-продуктов системы «Al + (-C₂F₄)_n»

Мемо	C	O	F	Al	Si	Total
32	29,73	13,14	5,36	47	4,77	100

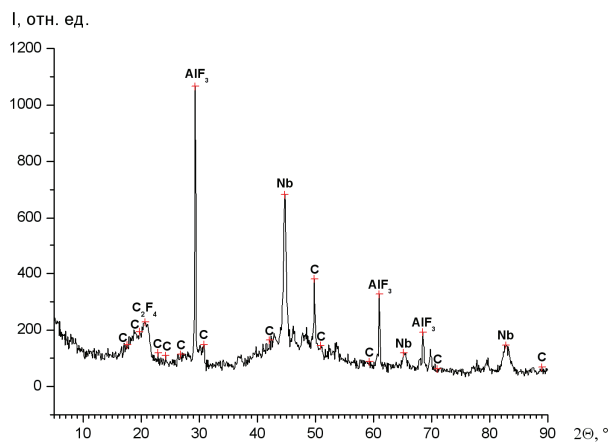


Рисунок 3 – Дифрактограмма СВС-продуктов (CuK_α-излучение) в системе «Al + (-C₂F₄)_n»

Рентгенофазовый анализ СВС-продуктов в системе «алюминий + политетрафторэтилен + парафин» показал наличие в СВС- продуктах синтезированного углерода (см. рис. 4).

На малых углах отражений видны максимумы, свидетельствующие о наличии синтезированных углеродных наноматериалов.

По дифрактограмме рассчитана ОКР, значения которой позволило оценить размеры углеродных наночастиц $d \approx 30,8$ нм. Максимум пика, на основании которого рассчитывали ОКР, - 24,9°. Таким образом, в процессе горения смеси «алюминий + политетрафторэтилен» с добавлением парафина происходит синтез наноструктурного углерода.

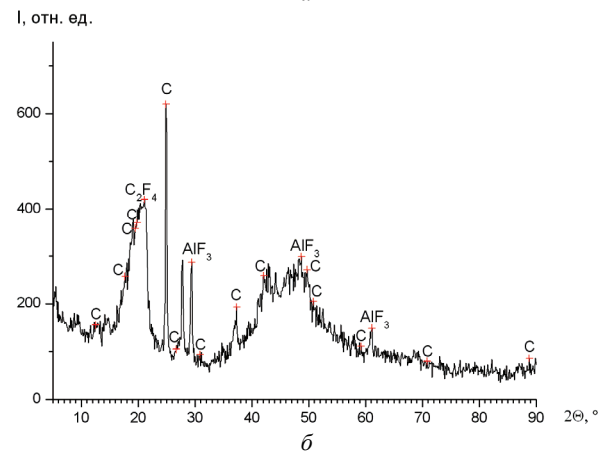
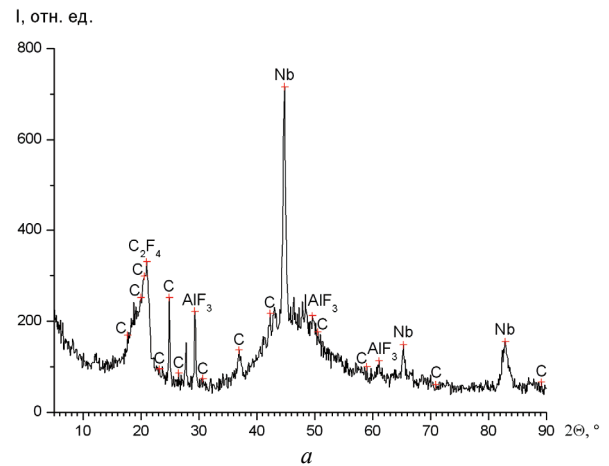


Рисунок 4 – Дифрактограммы СВС-продуктов (CoK_α-излучение) в системе «Al + (-C₂F₄)_n» с добавлением парафина: а – 10 %; б – 20 %

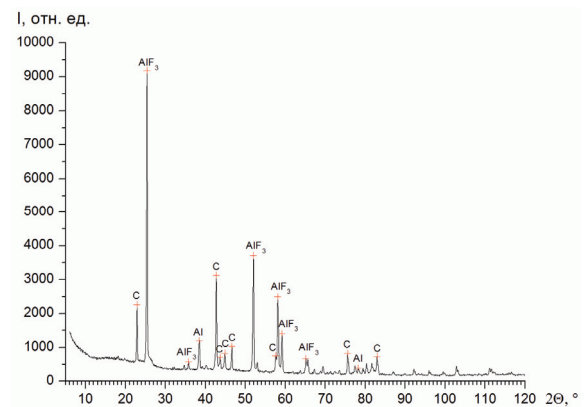


Рисунок 5 – Дифрактограммы СВС-продуктов (CuK_α-излучение) в системе «Al + (-C₂F₄)_n» с добавлением циклогексана (15 мас. %)

Рентгенофазовый анализ СВС-продуктов в системе «алюминий + политетрафторэтилен + циклогексан» показал наличие в СВС-продуктах синтезированного углерода (см. рис. 5).

На малых углах отражений видны максимумы, свидетельствующие о наличии синтезированных углеродных наноматериалов гексагональной формы (пространственная группа P 63/m m c).

По дифрактограмме рассчитаны ОКР, значения которых позволили оценить размеры углеродных наночастиц $d \approx 35,8$ нм и $d \approx 41,9$ нм. Максимумы пиков, на

основании которых рассчитывали ОКР, $-22,9^\circ$ и $42,7^\circ$.

Для получения углеродных нанотрубок был реализован СВС в системе «алюминий + политетрафторэтилен+ железо» (см. рис. 6), в которой железо (5 мас. %) является катализатором для роста нанотрубок [8, 9].

Сравнение дифрактограмм СВС-продуктов (рис. 3 и рис. 6) позволяет увидеть небольшое отличие, которое можно объяснить каталитическим действием железа – увеличение максимума отражений при $2\theta = 26,7^\circ$, которое может быть обусловлено синтезом углеродных нанотрубок.

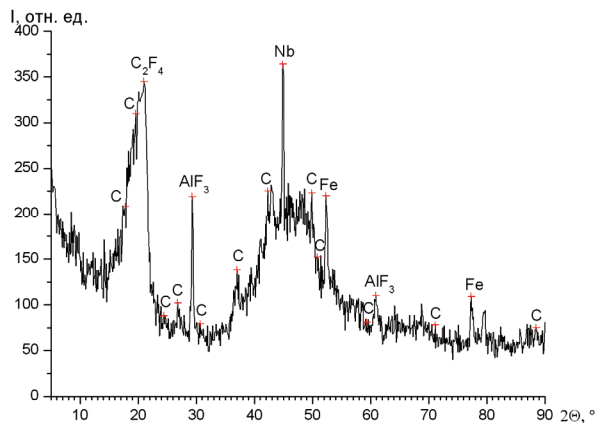
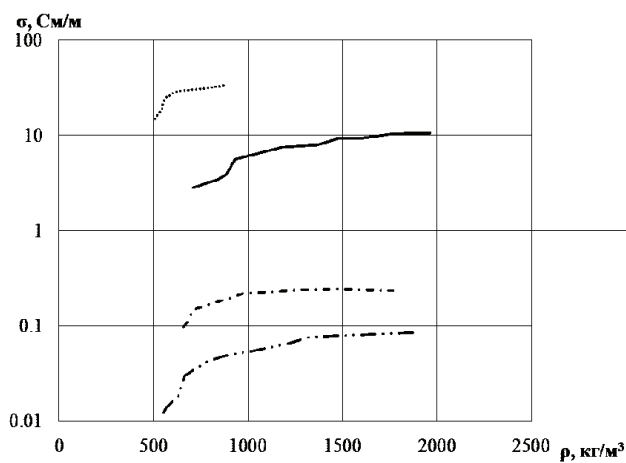


Рисунок 6 – Дифрактограмма СВС-продукта (CoK_α -излучение) системы «Al + $(-\text{C}_2\text{F}_4)_n$ » с добавлением 5 мас. % Fe



— — «алюминий + политетрафторэтилен»;
 — «алюминий + политетрафторэтилен + железо»;
 - - - «алюминий + политетрафторэтилен + парафин (10 %)»;
 - · - · «алюминий + политетрафторэтилен + парафин (20 %)»
 Рисунок 7 – Удельные электрические проводимости УНМ, синтезированных из указанных СВС- систем, при разной степени компактирования порошков

По известной массе и измеренному сопротивлению образцов, согласно выражениям (3) и (4), рассчитаны плотности и удельные электрические проводимости полученных порошков УНМ при разной степени компактирования, по которым определены зависимости удельной электрической проводимости от плотности (см. рис. 7).

Как видно из рис. 7, удельная электрическая проводимость порошков, синтезированных при использо-

вании разных исходных СВС систем, изменяется, в зависимости от степени сжатия, от 0,01 См/м до 50 См/м.

Разные величины электропроводности УНМ обусловлены наличием в порошках разных аллотропных форм углерода [10, 11].

Выводы. Проведены экспериментальные исследования СВ синтеза углеродных наноматериалов в порошковой смеси «алюминий + политетрафторэтилен» с добавками углеводородов и катализатора.

СВ синтез в системе «алюминий + политетрафторэтилен + углеводород» реализуется при условии, что массовая доля углеводорода в исходной смеси не превышает 20 %. Использование углеводородов препятствует окислению СВС продуктов и увеличивает выход УНМ.

Размер наночастиц УНМ, рассчитанный по дифрактограммам, составляет 30 нм.

Получены зависимости удельных электрических проводимостей углеродных наноматериалов от плотности при разной степени компактирования порошков. Различные величины электропроводности (от 0,01 См/м до 50 См/м) обусловлены наличием в порошках разных аллотропных форм углерода.

Список литературы:

1. Амосов А.П. О возможности получения наноглерода при химико-конденсационном горении порошковых смесей / А.П. Амосов, Ю.М. Марков, С.М. Ахметсагиров, Г.В. Бичуров // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2007. – № 1. – С. 107-113.
2. Челпанов Д.И. Разрядноимпульсная инициация процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в некоторых порошковых системах / Д.И. Челпанов, Н.И. Кускова, А.А. Смалько // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. праць. – 2015. – № 51. – С. 115-120.
3. Кускова Н.И. Разрядноимпульсная установка для реализации самораспространяющегося высокотемпературного синтеза углеродных наноматериалов / Н.И. Кускова, М.Н. Тарасюк, Д.И. Челпанов // Матер. Всеукр. наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки», 21-22 квітня 2016 р. – Миколаїв: НУК, 2016. – С. 49-50.
4. Челпанов Д.И. Пат. 104443, Украина Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів / Д.И. Челпанов, Н.И. Кускова, А.О. Смалько. – 2016.
5. Челпанов Д.И. Условия разрядноимпульсного инициирования и параметры процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза углеродных наноматериалов / Д.И. Челпанов, В.Ю. Бакларь, Н.И. Кускова, А.Н. Корзинова // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. праць. – 2016. – № 51. – С. 115-120.
6. Альмяшева О.В. Размер, морфология и структура частиц нанопорошка диоксида циркония, полученного в гидротермальных условиях / О.В. Альмяшева, Б.А. Федорова, А.В. Смирнов, В.В. Гусаров // Наносистемы: Физика, Химия, Математика. – 2010. – Т. 1, № 1. – С. 26 - 36.
7. Челпанов Д.И. Возможные процессы электроразрядного синтеза углеродных наноматериалов с различной электрической проводимостью / Д.И. Челпанов, Н.И. Кускова // Вісник НУК. – 2015. – № 1. – С. 50-57.
8. Алексеев Н.И. О механизме образования углеродных

нанотрубок в електрохімічних процесах / *Н.И. Алексеев, С.В. Половцев, Н.А. Чарыков* // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 79, вып. 3. – С. 57-63.

9. Алексеев Н.И. Физические механизмы формирования фуллеренов и углеродных нанотрубок: автореф. дис. на соискание учен. степени д-ра физ.-мат. наук: спец. 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» / *Н.И. Алексеев*. – Новгород Великий, 2009. – 35 с.

10. Юцишина А.Н. О возможных процессах формирования углеродных наноматериалов при электроразрядной обработке углеводородов / *А.Н. Юцишина, Н.И. Кускова, Д.И. Челпанов* // Электронная обработка материалов. – 2015. – № 3. – С. 1-5.

11. Кускова Н.И. Электрофизические свойства углеродных наноматериалов / *Н.И. Кускова, А.Д. Рудь, С.В. Петриченко, Д.И. Челпанов, П.Л. Цолин* // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. праць. – 2016. – № 36 (1208). – С. 52-57.

References (transliterated):

1. Amosov A.P., Markov Ju.M., Ahmetsagirov S.M., Bichurov G.V. O vozmozhnosti poluchenija nanougleroda pri himiko-kondensacionnom gorenii poroshkovykh smesey [On the possibility of nanocarbon production using chemical-condensing combustion of powder mixtures]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Ser.: Tehničeskije nauki. 2007, no. 1, pp. 107-113.

2. Chelpanov D.I., Kuskova N.I., Smal'ko A.A. Razryadnoimpul'snaya initsiatsiya protsessov samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza v nekotorykh poroshkovykh sistemakh [Pulse discharge initiation of self-propagating high-temperature synthesis processes in some powder systems]. Visnik NTU «KhPI». Ser. Tekhnika ta elektrofizika visokikh naprug: zb. nauk. prats'. 2015, no. 51, pp. 115-120.

3. Kuskova N.I., Tarasyuk M.N., Chelpanov D.I. [Pulse-discharge installation for the implementation of SHS of carbon nanomaterials]. Mater. Vseukr. nauk.-tekh. konf. «Suchasni problemi avtomatiki ta elektrotehniki». 21-22 kvitnya 2016 r., Mykolaiv. [Novel problems of automatics and electrical techniques. Abstracts of the Int. Conf. (21–22 April 2016, Mykolaiv)]. Mykolaiv, AMNUS, 2016, pp. 49-50.

4. Chelpanov D.I., Kuskova N.I., Smal'ko A.O. Sposib oderzhannya vugletsevykh nanomaterialiv [Method of carbon nanomaterials production]. Patent UA, no. 104443, 2016.

5. Chelpanov D.I., Baklar' V.Yu., Kuskova N.I., Korzinova A.N. Usloviya razryadnoimpul'snogo initsiirovaniya i parametry protsesa samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza uglerodnykh nanomaterialov [Conditions for the pulse discharge initiation and parameters of the process of self-propagating high-temperature synthesis of carbon nanomaterials]. Visnik NTU «KhPI». Ser. Tekhnika ta elektrofizika visokikh naprug: zb. nauk. prats'. 2016, no. 51, pp. 115-120.

6. Al'myasheva O.V., Fedorova B.A., Smirnov A.V., Gusarov V.V. Razmer, morfologiya i struktura chastits nanoporoshka dioksida tsirkoniya, poluchennogo v gidrotermal'nykh usloviyakh [Size, morphology and structure of zirconia nanopowder particles obtained under hydrothermal conditions]. Nanosistemy: Fizika, Khimiya, Matematika. 2010, vol. 1, no. 1, pp. 26-36.

7. Chelpanov D.I., Kuskova N.I. Vozmozhnye protsessy elektrorazryadnogo sinteza uglerodnykh nanomaterialov s razlichnoy elektricheskoy provodimost'yu [Possible processes of electrical discharge synthesis of carbon nanomaterials with different electrical conductivity]. Visnik NUK. 2015, no. 1, pp. 50-57.

8. Alekseev N.I., Polovtsev S.V., Charykov N.A. O mekhanizme obrazovaniya uglerodnykh nanotrubok v elektrokhičeskikh protsessakh [On the mechanism of formation of carbon nanotubes in electrochemical processes]. Zhurnal tehničeskoy fiziki. 2006, vol. 79, issue 3, pp. 57-63.

9. Alekseev N.I. Fizicheskie mekhanizmy formirovaniya fullerenov i uglerodnykh nanotrubok: avtoref. dis. na soiskanie uchen. stepeni d-ra fiz.-mat. nauk: spets. 01.04.07 «Fizika kondensirovannogo sostoyaniya» [The physical mechanisms of formation of fullerenes and carbon nanotubes. Abstract of a thesis dr. phys.-math. sci. diss. 01.04.07 "Condensed matter physics"] Novgorod Velikiy, 2009. 35 p.

10. Yushchishina A.N., Kuskova N.I., Chelpanov D.I. O vozmozhnykh protsessakh formirovaniya uglerodnykh nanomaterialov pri elektrorazryadnoy obrabotke uglevodorodov [About possible mechanism of formation of the carbon nanomaterials by the electrodischarge treatment of the hydrocarbons]. Elektronaya obrabotka materialov. – 2015, no. 3, pp. 1-5.

11. Kuskova N.I., Rud' A.D., Petrichenko S.V., Chelpanov D.I., Tsolin P.L. Elektrofizicheskie svoystva uglerodnykh nanomaterialov [Electrical and physical properties of carbon nanomaterials]. Visnik NTU «KhPI». Ser. Tekhnika ta elektrofizika visokikh naprug: zb. nauk. prats'. 2016, no. 36 (1208), pp. 52-57.

Postupila (received) 19.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Високотемпературний синтез вуглецевих наноматеріалів / Н.І. Кускова, Д.І. Челпанов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 79-83. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Високотемпературный синтез углеродных наноматериалов / Н.И. Кускова, Д.И. Челпанов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 79-83. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

High-temperature synthesis of carbon nanomaterials / N.I. Kuskova, D.I. Chelpanov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 79-83. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кускова Наталія Іванівна – доктор технічних наук, професор, зав. відділом електрофізичних досліджень Інституту імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Кускова Наталья Ивановна – доктор технічних наук, професор, зав. відділом електрофізических досліджень Інституту імпульсних процесів та технологій НАН України; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Kuskova Natalya Ivanovna – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electrophysical Researches of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Челпанов Дмитро Ілліч – аспірант, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Челпанов Дмитрий Ильич – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Chelpanov Dmitry Illych – Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Postgraduate Student; tel.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

УДК 621.317.3

Ю. С. НЕМЧЕНКО**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ В НИПКИ «МОЛНИЯ»
ИСПЫТАНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ
СОВМЕСТИМОСТЬ ПО СТАНДАРТАМ НАТО**

Детально розглянуто структури стандартів НАТО на ЕМС військової техніки АЕСТР-500 та АЕСТР-250. Складено детальні таблиці поширення тих або інших видів випробувань на окремі види військової техніки, а також проаналізовані можливості нашої випробувальної і метрологічної техніки (сьогоднішні і в найближчій перспективі) проводити випробування за стандартом АЕСТР-500. З цього аналізу видно, що на сьогодні ми можемо проводити випробування в повному об'ємі за 10-ма (з 15-ти) видами випробувань, а в найближчій перспективі ще за 3-ма видами. Два види випробувань на блискавкостійкість можемо виконувати вже сьогодні, а ще один - в найближчій перспективі. Для реалізації стандарту АЕСТР-250 потрібно великі фінансові витрати і тривалий час.

Ключові слова: випробування, електромагнітна сумісність, блискавкостійкість, об'єкти військової техніки, норми випробувань.

Подробно рассмотрены структуры стандартов НАТО на ЭМС военной техники АЕСТР-500 и АЕСТР-250. Составлены подробные таблицы распространения тех или иных видов испытаний на отдельные виды военной техники, а также проанализированы возможности нашей испытательной и метрологической техники (сегодняшние и в ближайшей перспективе) проводить испытания по стандарту АЕСТР-500. Из этого анализа видно, что на сегодняшний день мы можем проводить испытания в полном объеме по 10 (из 15) видам испытаний, а в ближайшей перспективе еще по 3 видам. Два вида испытаний на молниестойкость можем выполнять уже сегодня, а еще один – в ближайшей перспективе. Для реализации стандарта АЕСТР-250 требуются большие финансовые затраты и длительное время.

Ключевые слова: испытания, электромагнитная совместимость, молниестойкость, объекты военной техники, нормы испытаний.

We considered the structure of NATO standards on EMC of military equipment АЕСТР-500 and АЕСТР-250 in detail. Compiled detailed tables spread of various types of tests for certain types of military equipment, as well as analysis of the capabilities of our test and metrology equipment (today and in the near future) testing to standard АЕСТР-500. From this analysis it is clear that today we can carry out tests in full 10 (of the 15) kinds of tests, and in the short term, even for 3 kinds. Two tests on stability to lightning flash can perform today, and another - in the short term. For the implementation of the standard АЕСТР-250 is costly and long term.

Keywords: tests, electromagnetic compatibility, stability to lightning flash, objects of military equipment, testing standards.

Введение. За период до 2016 г. в НИПКИ «Молния» было испытано несколько десятков единиц составных частей военной техники, в первую очередь, бортового авиационного оборудования (БАО), предназначенного для установки на боевые самолеты. Испытания на электромагнитную совместимость (ЭМС) и молниестойкость проводились по нескольким стандартам разработки СССР, в том числе по ОСТ В1 02763-95, ОСТ В1 02696-90, ОСТ 1 01160-88, ГОСТ 19705-89.

В 2016 году по заказам зарубежных потребителей отечественной продукции военного назначения (Индия, Китай, Пакистан, Израиль и т.д.) мы проводили испытания на ЭМС по военному стандарту США MIL-STD-461F [1].

С этой целью мы проанализировали стандарт MIL-STD-461F на предмет возможности применения имеющегося у нас испытательного и измерительного оборудования под те виды испытания, которые входят в этот стандарт. Оказалось, что из 12 видов испытаний, которые наиболее применимы к нашей практике, 8 видов мы можем выполнить в полном объеме, еще 2 вида, связанные с измерением радиопомех и нагружением внешними электромагнитными полями в диапазоне частот до 18 ГГц и выше, мы можем выполнить частично, а для 2 видов нагружений CS115 и CS116 у нас нет соответствующей аппаратуры. Последний не-

достаток удалось устранить путем альтернативных испытаний, изложенных в Приложении к стандарту MIL-STD-461E, а именно, заменив CS115 испытаниями по стандарту IEC 61000-4-4 [2], а CS116 – испытаниями по стандарту IEC 61000-4-12 [3], на которые у нас есть лицензия и все необходимое оборудование.

В связи со стремлением Украины войти в НАТО, необходимо будет всю украинскую военную технику разрабатывать по стандартам НАТО, в том числе и по стандартам на ЭМС. Таких стандартов два: АЕСТР-500 [4] – на ЭМС составных частей военной техники и АЕСТР-250 [5] – на военные изделия в целом.

Рассмотрение стандарта АЕСТР-500. Рассмотрим сначала стандарт АЕСТР-500 с точки зрения его полноты всеми видами испытаний на ЭМС. Сравнить его будем со стандартом США на БАО для гражданской авиации RTCA/DO-160D [6], который в этой области является наиболее полным и отработанным стандартом. Стандарт RTCA/DO-160D содержит 5 независимых наборов испытаний (рис. 1), а именно:

- испытания на эмиссию радиопомех (ЭРП);
- испытания на устойчивость к внешним электромагнитным помехам (УЭМП);
- испытания на молниестойкость (МС);
- испытания на электростатический разряд

(ЭСР);

– испытания на качество электроэнергии (КЭЭ).

Так вот стандарт АЕСТР-500 и MIL-STD-461G содержат 4, но не одинаковых по объему, набора испытаний, а именно, испытания на ЭРП, УЭМП, МС и ЭСР, в то время как MIL-STD-461F содержит всего лишь 2 набора (ЭРП и УЭМП). Более широкий спектр испытаний в АЕСТР-500 по сравнению с MIL-STD-461G объясняется тем, что он в своем составе содержит в полном объеме стандарт MIL-STD-461 ~70 % объема, а остальные 30 % – это испытания из европейского стандарта Def Stan 59-411.

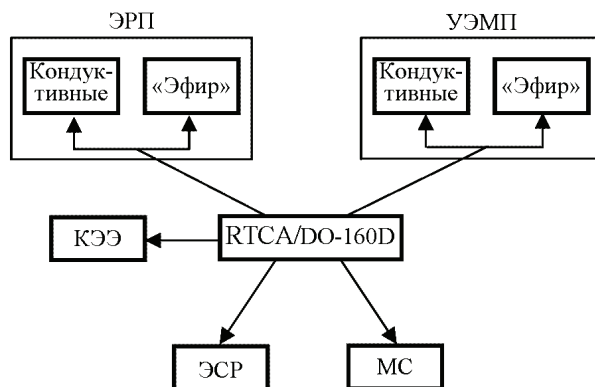


Рисунок 1 – Наборы испытаний по RTCA/DO-160D

Рассмотрим более подробно построение стандарта АЕСТР-500. Во многом это построение подобно построению MIL-STD-461, а именно:

– все виды испытаний скомпонованы в 4 буквенных аббревиатуры – CE, CS, RE и RS., где E – это эмиссия, S – устойчивость, C – кондуктор или проводник, R – излучение, т.е. CE и RE – это эмиссия радиопомех в проводники, отходящие от изделия или в «эфир», а CS и RS – это устойчивость к электромагнитным помехам или по проводникам, отходящим от изделия, или по «эфиру».

– внутри каждого вышперечисленного набора испытаний идет цифровая нумерация от 101 и далее;

– в связи с тем, что стандарт MIL-STD-461 пересматривается каждые 5 лет, то из последующих версий часть видов испытаний исчезает, поэтому в стандарте MIL-STD-461F возникают пропуски.

В стандарте же АЕСТР-500 к вышеназванным буквенным аббревиатурам добавили букву N, т.е. теперь все виды испытаний описываются аббревиатурами NCE, NCS, NRE и NRS, пропуски в нумерации испытаний отсутствуют, а виды испытаний имеют нумерацию от 01.

Рассмотрение конкретных видов испытаний.

Наибольшее количество видов испытаний на ЭМС относится к БАО, поэтому в дальнейшем мы рассмотрим все виды испытаний для БАО. Виды и нормы испытаний для других видов военной техники будут рассмотрены в дальнейшем.

Вид испытаний *NCE01 – Эмиссия низкочастотных токов радиопомех (от 30 Гц до 10 кГц) в проводах электропитания*, нормы на которые приведены на рис. 2.

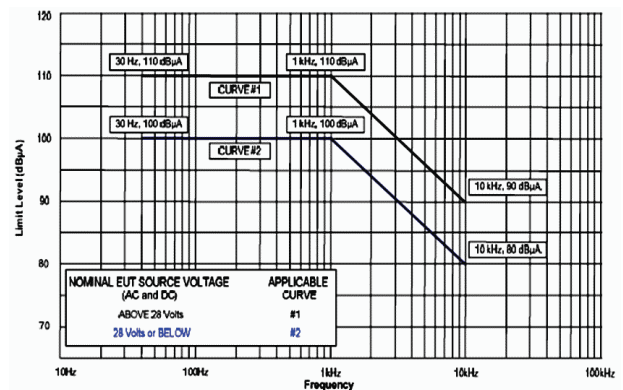


Рисунок 2 – Нормы на эмиссию низкочастотных токов радиопомех в проводах электропитания

Данный вид эмиссии присутствует в стандартах СССР, поэтому для его реализации у нас есть **все необходимое оборудование**.

Вид испытаний *NCE02 – Эмиссия высокочастотных напряжений радиопомех (от 10 кГц до 10 МГц) в проводах электропитания*, нормы на которые приведены на рис. 3.

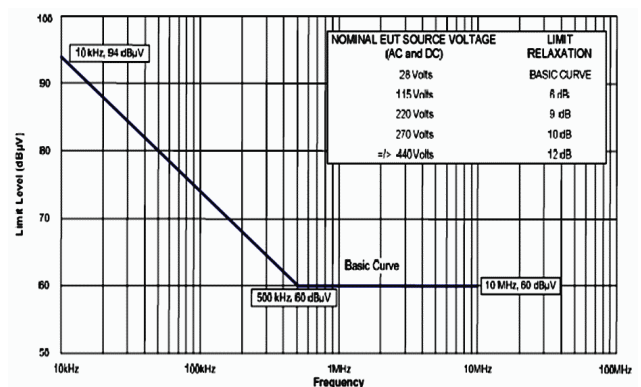


Рисунок 3 – Нормы на эмиссию высокочастотных напряжений радиопомех в проводах электропитания

Данный вид эмиссии присутствует в стандартах СССР и GISP, поэтому для его реализации у нас **есть все необходимое оборудование**.

Вид испытаний *NCE05 – Эмиссия высокочастотных токов радиопомех (от 30 Гц до 150 МГц) в межблочных линиях связи*, нормы на которые приведены на рис. 4.

Данный вид эмиссии присутствует в стандарте DO-160D, поэтому для его реализации у нас **есть все необходимое оборудование**.

Вид испытаний *NCE04 – Эмиссия напряжения переходных процессов в проводах электропитания при включении или выключении источника электропитания 28 В постоянного тока*, нормы на которые приведены ниже.

I. ± 100 В пик.

II. ± 90 В от пика для периода не более 10 мкс.

III. ± 80 В от пика для периода не более 5 мс.

Данный вид эмиссии нами измерялся по отдельным ТЗ, поэтому для его реализации у нас **есть все необходимое оборудование**.

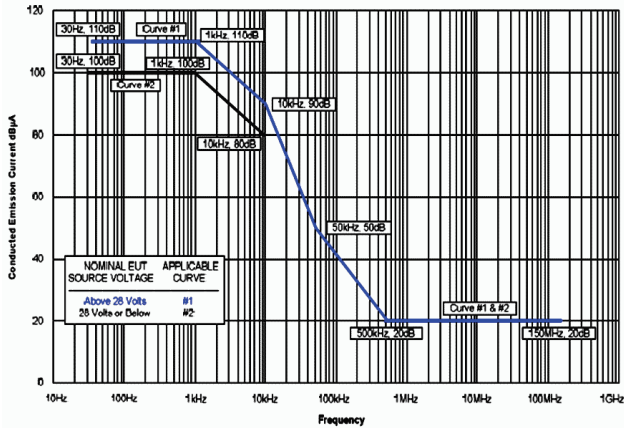


Рисунок 4 – Нормы на эмиссию высокочастотных токов радиопомех в межблочных линиях связи

Вид испытаний *NCS01* – *Нагрузка силового порта гармоническими напряжениями в диапазоне частот от 30 Гц до 150 кГц*, нормы на которые приведены на рис. 5.

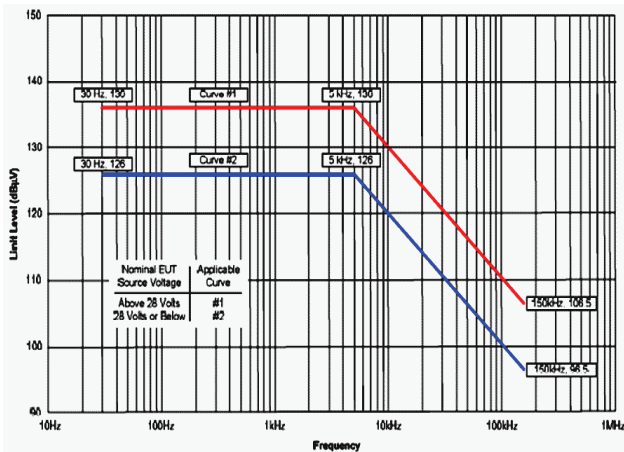


Рисунок 5 – Нормы нагружения силового порта гармоническими напряжениями

Данный вид нагружений присутствует в стандарте DO-160D, поэтому для его реализации у нас **есть все необходимое оборудование**.

Вид испытаний *NCS02* – *Нагружение контрольных и сигнальных проводов гармоническими токами через гибкий индуктор в диапазоне частот от 20 Гц до 50 кГц*, нормы на которые приведены на рис. 6.

Данный вид нагружений отсутствовал в других стандартах, но для его реализации у нас **есть все необходимое оборудование**.

Вид испытаний *NCS07* – *Нагружение проводов электропитания, контрольных и сигнальных проводов гармоническими токами в диапазоне частот от 10 кГц до 200 МГц*, нормы на которые приведены на рис. 7 (кривые 3 и 5).

Данный вид нагружений присутствует в стандарте DO-160D, поэтому для его реализации у нас **есть все необходимое оборудование**.

Вид испытаний *NCS08* – *Нагружение проводов электропитания, контрольных и сигнальных проводов импульсными токами*, форма и амплитудно-

временные параметры которых на которые приведены на рис. 8.

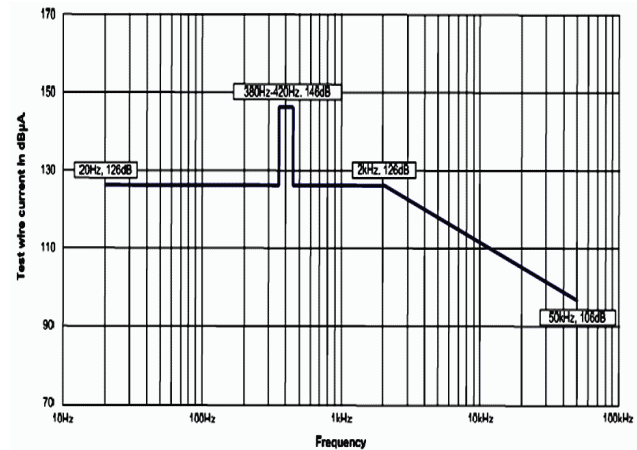


Рисунок 6 – Нормы нагружения контрольных и сигнальных проводов гармоническими токами через гибкий индуктор

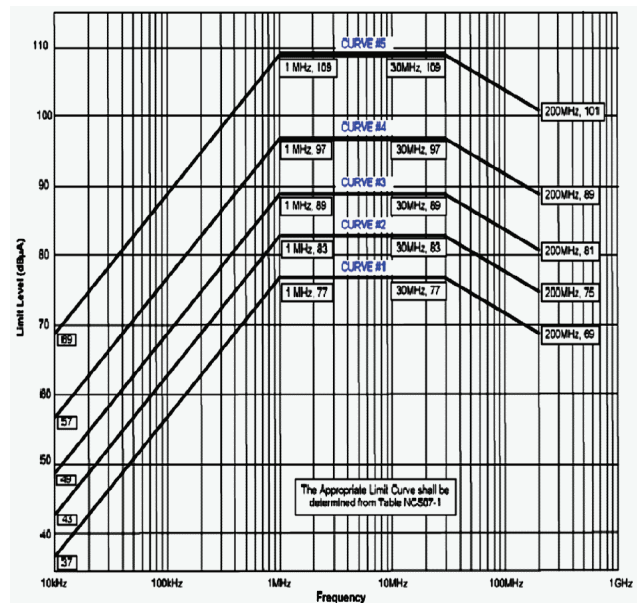


Рисунок 7 – Нормы нагружения проводов электропитания, контрольных и сигнальных проводов гармоническими токами

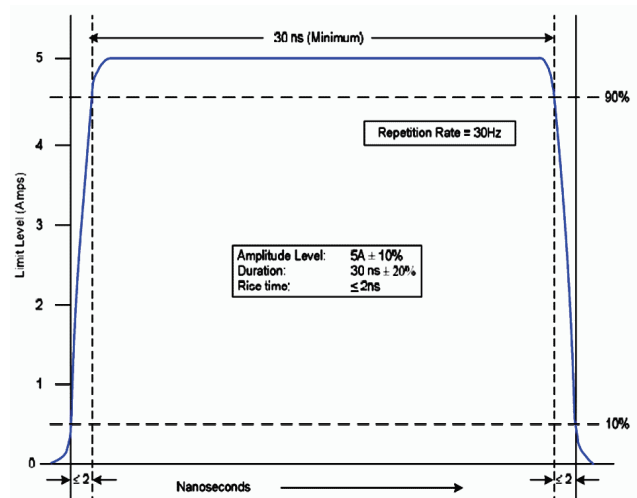


Рисунок 8 – Нормы нагружения проводов электропитания, контрольных и сигнальных проводов импульсными токами

Данный вид нагружений отсутствует в других стандартах, поэтому для его реализации у нас **нет необходимого оборудования, оно находится в стадии разработки.**

Вид испытаний *NCS09 – Нагружение проводов электропитания, контрольных и сигнальных проводов затухающими синусоидальными токами в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц*, форма и нормы на них приведены на рис. 9 и 10.

Данный вид нагружений отсутствует в других стандартах, поэтому для его реализации у нас **нет необходимого оборудования, оно находится в стадии завершения изготовления.**

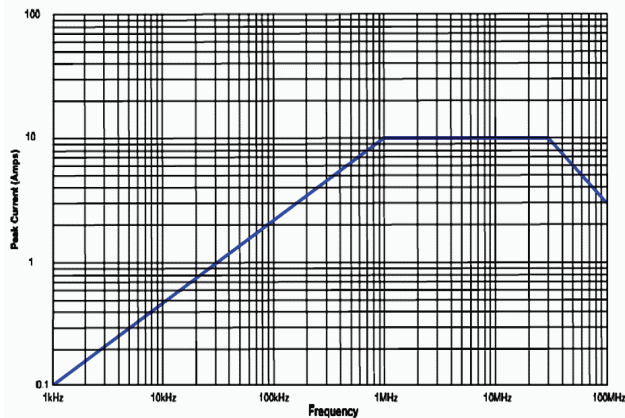
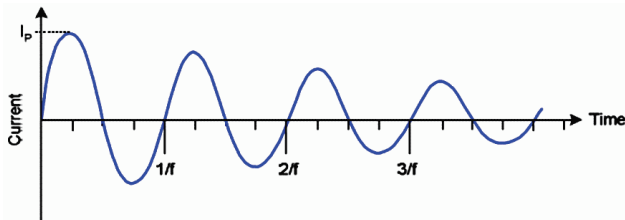


Рисунок 9 – Нормы нагружения проводов электропитания, контрольных и сигнальных проводов затухающими синусоидальными токами



- Notes:
- Normalized Waveform: $e^{-(t/T)Q} \sin(2\pi ft)$
Where:
f = Frequency (Hz)
t = Time (sec)
Q = Damping Factor 15 ± 5
 - Damping Factor Q shall be determined as follows:
$$Q = \frac{\pi(N-1)}{\ln(I_p/I_N)}$$

Where:
Q = Damping Factor
N = Cycle Number (i.e. N = 2, 3, 4, 5.....)
 I_p = Peak Current at 1st Cycle
 I_N = Peak Current at closest to 50% decay
 I_n = Natural Log
 - I_p as specified in Figure NCS09-2

Рисунок 10 – Формы нагружения проводов электропитания, контрольных и сигнальных проводов затухающими синусоидальными токами

Вид испытаний *NCS10 – Наведенная молниестойкость*, форма и нормы на них приведены на рис. 11-13 и табл. 1.

Виды нагружений (**короткий и средний импульсы**) присутствуют в стандарте DO-160D, поэтому для их реализации у нас **есть все необходимое оборудование**, а для **длинного импульса** **необходимой**

аппаратуры пока нет, оно находится в стадии разработки.

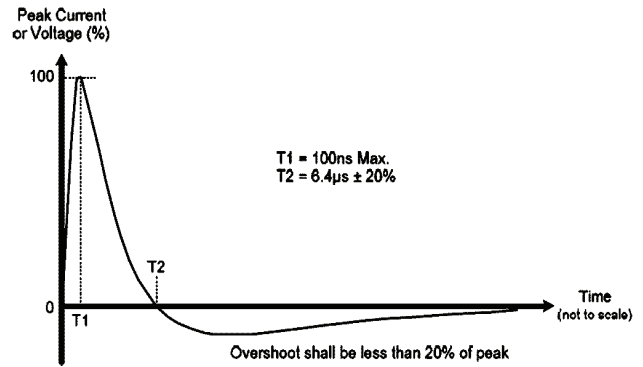


Рисунок 11 – Короткий импульс

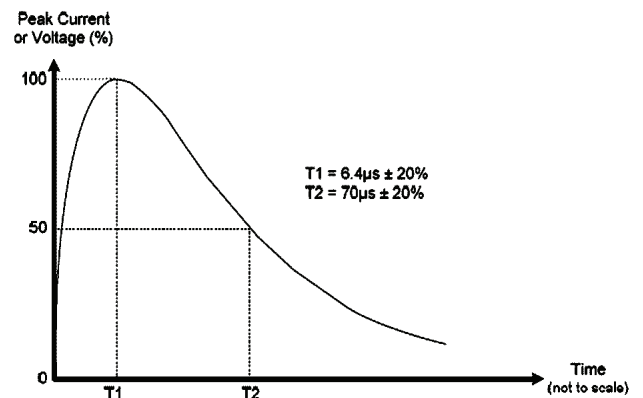


Рисунок 12 – Средний импульс

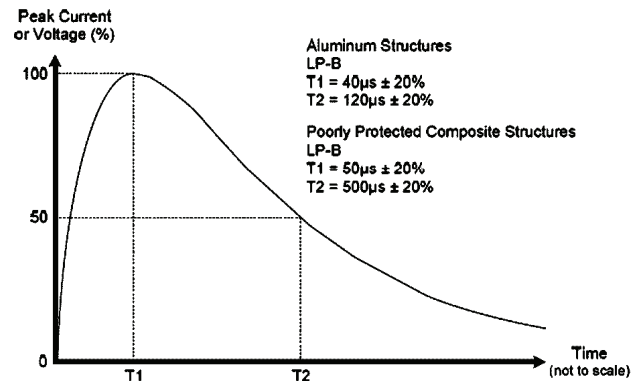


Рисунок 13 – Длинный импульс

Таблица 1 – Нормы по молниестойкости

Category	Peak waveform amplitude, current and voltage					
	Short		Intermediate		Long	
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
A	125	250	125	250	N/A	N/A
B	300	600	300	600	2000	1000
C	750	1500	750	1500	2000	3000
D	1600	3200	1600	3200	2000	10000

Вид испытаний *NCS12 – Устойчивость к электростатическим разрядам*, нормы на которые приведены в табл. 2 (контактный ЭСР).

Таблица 2 – Нормы на ЭСП

Charging Voltage (kV)	Category A Safety Critical	Category B Mission Critical
2	No	Yes
4	Yes	Yes
6	Yes	Yes
8	Yes	No

Для воздушных ЭСП – испытательное напряжение 15 кВ.

Данный вид нагружений присутствует в стандартах DO-160D и IEC 61000-4-2 [7], поэтому для его реализации у нас **есть все необходимое оборудование**.

Вид испытаний *NRE01 – Эмиссия низкочастотного магнитного поля радиопомех (от 30 Гц до 100 кГц)*, нормы на которые приведены на рис. 14.

Данный вид эмиссии присутствует в стандарте СССР, поэтому для его реализации у нас **есть все необходимое оборудование**.

Вид испытаний *NRE02 – Эмиссия высокочастотного электрического поля радиопомех (от 10 кГц до 18 ГГц)*, нормы на которые приведены на рис. 15.

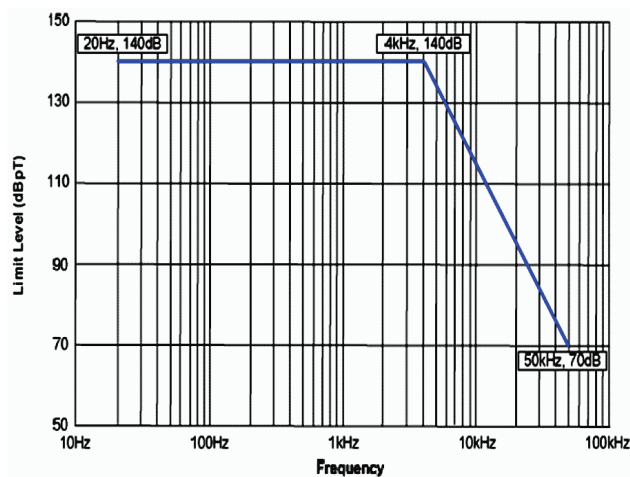


Рисунок 14 – Нормы на эмиссию низкочастотного магнитного поля радиопомех

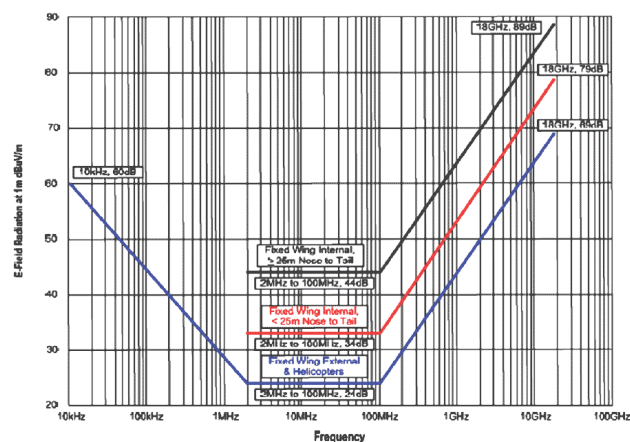


Рисунок 15 – Нормы на эмиссию высокочастотного электрического поля радиопомех

Данный вид измерений выполняется частично,

т.к. измерительное оборудование НИПКИ «Молния» позволяет измерять радиопомехи по «эфиру» в диапазоне частот от 10 кГц до 2 ГГц. В то же время, с учетом **Примечания к п. RE102 MIL-STD-461F**, по которому достаточно измерять эти радиопомехи или до 1 ГГц, или до частоты, равной 10-ти частотам внутренних источников радиопомех, можно сказать, что **этот вид измеряется в полном объеме**

Вид испытаний *NRS01 – Нагружение изделия гармоническими магнитными полями в диапазоне частот от 30 Гц до 100 кГц*, нормы на которые приведены на рис. 16.

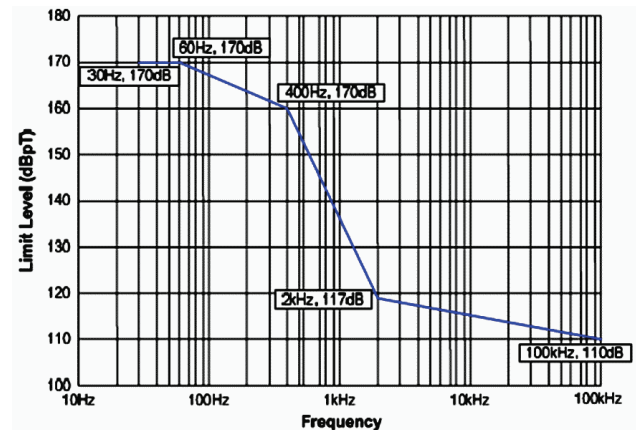


Рисунок 16 – Нормы нагружения изделия гармоническими магнитными полями

Данный вид нагружений присутствует в стандарте СССР, поэтому для его реализации у нас **есть все необходимое оборудование**

Вид испытаний *NRS02 – Нагружение изделия гармоническими электрическими полями в диапазоне частот от 2 МГц до 40 ГГц (HIRF)*, нормы на которые приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Нормы нагружения изделия гармоническими электрическими полями

Частотный диапазон	Напряженность электрического поля, В/м
от 2 МГц до 30 МГц	200
от 30 МГц до 1 ГГц	200
от 1 ГГц до 18 ГГц	200
от 18 ГГц до 40 ГГц	200

Данный вид испытаний выполняется **частично**, т.к. оборудование НИПКИ «Молния» позволяет нагружать испытываемые изделия в диапазоне частот от 2 МГц до 3 ГГц с величиной до 50 В/м.

В итоговой табл. 4 приведены наши возможности реализовать испытания на ЭМС по стандарту НАТО АЕСТР-500.

Из таблиц 501-6 и 501-7 АЕСТР-500 видно, что для испытания бортового авиационного оборудования применяются все 15 видов, для составных частей наземной военной техники – 13 видов, для составных частей подводных лодок – 12 видов, для составных частей кораблей – 11 видов, для составных частей космических объектов – 7 видов.

Рассмотрение стандарта АЕСТР-250.

Стандарт АЕСТР-250 посвящен электромагнитной обстановке, окружающей объект военной техники. Он включает в себя как сравнительно слабые электромагнитные поля от радио и телестанций и постоянные, и низкочастотные поля, так и мощные электромагнитные помехи (МЭМП) естественного и искусственного происхождения. К МЭМП относятся ЭСР как от людей, так и от летательных аппаратов, прямые удары молнии всех видов (единичные удары, многократные удары и многократные вспышки), электромагнитный импульс ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ), высокомошнные микроволновые излучения и мощные непрерывные и импульсные электромагнитные помехи (например, от РЛС).

Рассмотрим подробнее нормы на МЭМП.

1. Электростатический разряд

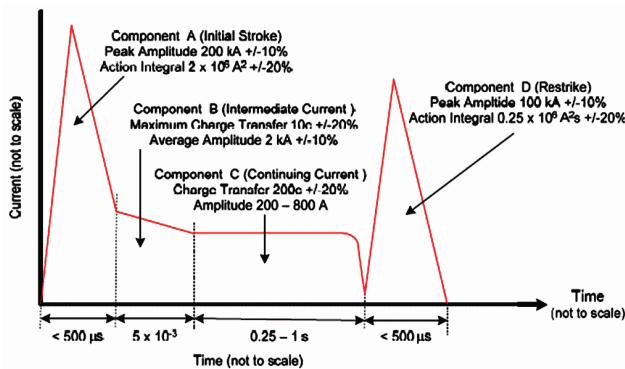
Различают ЭСР для объектов военной техники (ОВТ) и гражданской техники *см. табл. 5).

Отдельно в стандарте приведены более жесткие требования для вертолетов (см. табл. 6).

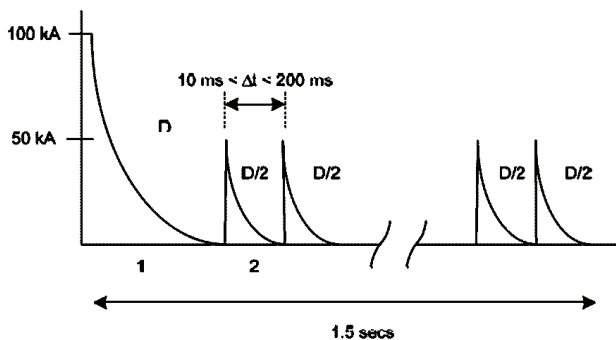
2. Прямой удар молнии

В стандарте рассмотрены 3 вида ударов молнии:

- единичные удары (рис. 17);
- многократные удары (рис. 18);



(максимальная амплитуда тока 200 кА)
Рисунок 17 – Единичные удары



(максимальная амплитуда тока первого удара 100 кА)
Рисунок 18 – Многократные удары

– многократные вспышки (рис. 19).

3. Электромагнитный импульс ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ)

Форма и амплитудно-временные параметры ЭМИ ЯВ (рис. 20) совпадают как для ОВТ, так и для гражданской техники, что видно из данного стандарта и из стандарта IEC 61000-4-25 [8].

Таблица 4 – Итоговая таблица возможностей НИПКИ «Молния» реализовать испытания на ЭМС по стандарту НАТО АЕСТР-500

Документ	Описание	Возможности НИПКИ «Молния»
NCE01	Conducted Emissions, Power Leads, 30 Hz to 10 kHz	в полном объеме
NCE02	Conducted Emissions, Power Leads, 10 kHz to 10 MHz	в полном объеме
NCE04	Conducted Emissions, Exported Transients on Power Leads	в полном объеме
NCE05	Conducted Emissions, Power, Control & Signal Leads, 30 Hz to 150 MHz	в полном объеме
NCS01	Conducted Susceptibility, Power Leads, 30 Hz to 150 kHz	в полном объеме
NCS02	Conducted Susceptibility, Control & Signal Leads, 20 Hz to 50 kHz	в полном объеме
NCS07	Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection, 10 kHz to 200 MHz	в полном объеме
NCS08	Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection, Impulse Excitation	в стадии проработки
NCS09	Conducted Susceptibility, Damped Sinusoidal Transients, Cables and Power Leads, 10 kHz to 100 MHz	в стадии изготовления
NCS010	Conducted Susceptibility, Imported Lighting Transients	частично (короткая и средняя волны – в полном объеме, длинная волна – в стадии проработки)
NCS12	Conducted Susceptibility, Electrostatic Discharge	в полном объеме
NRE01	Radiated Emissions, Magnetic Field, 30 Hz to 100 kHz	в полном объеме
NRE02	Radiated Emissions, Electric Field, 10 kHz to 18 GHz	в полном объеме с учетом Примечания к RE102 MIL-STD-461F
NRS01	Radiated Susceptibility, Magnetic Field, 30 Hz to 100 kHz	в стадии изготовления
NRS02	Radiated Susceptibility, Electric Field, 50 kHz to 40 GHz	частично

Таблица 5 – Нормы ЭСР

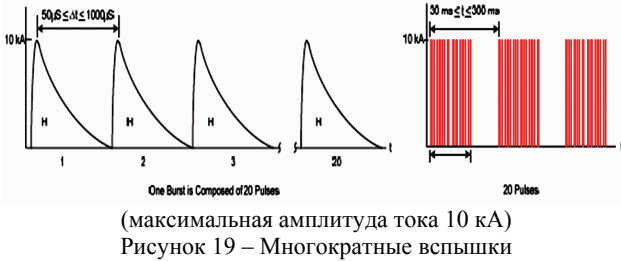
EQUIPMENT	PARAMETERS			
	ELECTROSTATIC VOLTAGE (kV)	CAPACITANCE (pF)	RESISTANCE (Ω)	CIRCUIT INDUCTANCE (μH)
MUNITIONS	25 ± 5%	500 ± 5%	500 ± 5%	5 max.
MUNITIONS	25 ± 5%	500 ± 5%	5000 ± 5%	5 max.
NON-MUNITIONS	8 ± 5% or 15 ± 5%	150 ± 5%	330 ± 5%	5 max.

Note: The voltage will be charged to positive and negative voltage.

Таблица 6 – Нормы ЭСР для вертолетов

CONFIGURATION	PARAMETERS			
	ELECTROSTATIC VOLTAGE (kV)	CAPACITANCE (pF)	RESISTANCE (Ω)	CIRCUIT INDUCTANCE (μH)
HELICOPTER	300 ± 5%	1000 ± 5%	≤1	20 max.

Note: The voltage of 300 kV will be charged to positive and negative voltage.



4. Мощное электромагнитное радиочастотное излучение (HIRF)

Параметры HIRF для авиации приведены в табл. 7, а для космоса – в табл. 8.

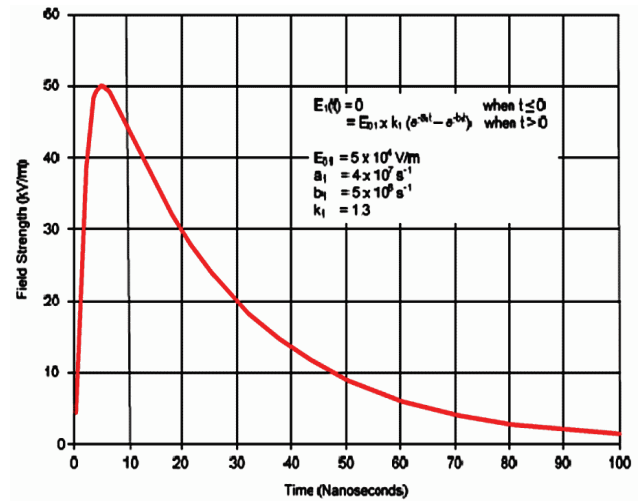
Таблица 7 – Параметры HIRF для авиации

Frequency Range (MHz)	Fixed Wing Aircraft Non Ship Operations		Rotary Wing Aircraft Non Ship Operations	
	Average (V/m)	Peak (V/m)	Average (V/m)	Peak (V/m)
	0.01 - 2	70	70	200
2 - 30	200	200	200	200
30 - 150	50	50	200	200
150 - 225	100	100	200	200
225 - 400	100	100	200	200
400 - 700	80	730	200	730
700 - 790	240	1,400	240	1,400
790 - 1000	240	1,400	240	1,400
1000 - 2000	200	3,300	250	5,000
2000 - 2700	490	4,500	490	6,000
2700 - 3600	490	4,500	490	6,000
3600 - 4000	490	4,500	490	6,000
4000 - 5400	300	7,200	400	7,200
5400 - 5900	300	7,200	400	7,200
5900 - 6000	300	7,200	400	7,200
6000 - 7900	200	1,100	170	1,100
7900 - 8000	200	1,100	170	1,100
8000 - 8400	330	3,000	330	5,000
8400 - 8500	330	3,000	330	5,000
8500 - 11000	330	3,000	330	5,000
11000 - 14000	330	2,000	330	2,000
14000 - 18000	330	2,000	330	2,000
18000 - 40000	420	1,000	420	1,000
40000 - 45000	--	--	--	--

В этих таблицах показано, что HIRF для авиации содержит как непрерывный HIRF, так и импульсный HIRF в несколько раз отличающийся друг от друга по величине, а для космических HIRF – они одинаковы.

Создание установок для воспроизведения МЭМП требует высокоэнергетических установок и больших финансовых затрат. Видимо поэтому в данном стан-

дарте не приводится информация о конструкции данных установок и методах их применения.



(форма ЭМИ ЯВ униполярный импульс 2/23 нс и амплитуда 50 кВ/м)

Рисунок 20 – Электромагнитный импульс ядерного взрыва

Таблица 8 – Параметры HIRF для космоса

Frequency Range (MHz)	Average (V/m)	Peak (V/m)
0.01 - 2	20	20
2 - 30	20	20
30 - 150	20	20
150 - 225	100	100
225 - 400	100	100
400 - 700	100	100
700 - 790	100	100
790 - 1000	100	100
1000 - 2000	200	200
2000 - 2700	200	200
2700 - 3600	200	200
3600 - 4000	200	200
4000 - 5400	200	200
5400 - 5900	200	200
5900 - 6000	200	200
6000 - 7900	200	200
7900 - 8000	200	200
8000 - 8400	200	200
8400 - 8500	200	200
8500 - 11000	200	200
11000 - 14000	20	20
14000 - 18000	20	20
18000 - 40000	20	20
40000 - 45000	--	--

Выводы:

1. Рассмотрена подробно структура стандарта НАТО на ЭМС – АЕСТР-500, в которой эти испытания составляют 15 обязательных видов.

2. Наши технические возможности на сегодняшний день позволяют производить испытания:

- в полном объеме – по 10 видам испытаний, а также по 2 из 3 видов испытаний на молниестойкость;
- через 1,5 года дополнительно еще – по 3 видам

испытаний, а также по 1 виду испытаний на молниестойкость;

– частично – по 1 виду испытаний.

3. Рассмотрена подробно структура стандарта НАТО на ЭМС – АЕСТР-250, из которой видно, что для создания полноценного испытательного полигона требуются большие финансовые затраты и длительное время.

Список литературы:

1. MIL-STD-461F Department of defense interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.
2. IEC 61000-4-4:2004 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measure techniques – Electrical fast transient/burst immunity test.
3. IEC 61000-4-12:2006 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-12: Testing and measure techniques – Ring wave immunity test.
4. АЕСТР 500 Electromagnetic environmental effects tests and verification. Edition E Version 1 December 2016.
5. АЕСТР 250 Electrical and electromagnetic environmental conditions.
6. RTCA/DO-160D, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, prepared by RTCA.
7. IEC 61000-4-2:2001 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Elec-

trostatic discharge immunity test.

8. IEC 61000-4-25:2001 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-25: Testing and measure techniques – HEMP immunity test methods for equipment and systems.

Bibliography (transliterated):

1. MIL-STD-461F Department of defense interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.
2. IEC 61000-4-4:2004 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-4: Testing and measure techniques – Electrical fast transient/burst immunity test.
3. IEC 61000-4-12:2006 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-12: Testing and measure techniques – Ring wave immunity test.
4. АЕСТР 500 Electromagnetic environmental effects tests and verification. Edition E Version 1 December 2016.
5. АЕСТР 250 Electrical and electromagnetic environmental conditions.
6. RTCA/DO-160D, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, prepared by RTCA.
7. IEC 61000-4-2:2001 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test.
8. IEC 61000-4-25:2001 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-25: Testing and measure techniques – HEMP immunity test methods for equipment and systems.

Поступила (received) 20.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Прогнозування можливості проведення в НДПКИ «Молнія» випробувань об'єктів воєнної техніки на електромагнітну сумісність за стандартами НАТО / Ю. С. Немченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 84-91. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Прогнозирование возможности проведения в НИПКИ «Молния» испытания объектов военной техники на электромагнитную совместимость по стандартам НАТО / Ю. С. Немченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 84-91. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Prediction of the possibility of NIPKI «Molnija» test of objects of military equipment on EMC to NATO standards / Y.S. Nemchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237) – С. 84-91. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Немченко Юрій Семенович – головний метролог, НДПКИ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-68-68; e-mail: nipkimolniya@kpi.kharkov.ua.

Немченко Юрий Семенович – главный метролог, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-68-68; e-mail: nipkimolniya@kpi.kharkov.ua..

Nemchenko Jurij Semenovich – Main Metrologist, Leading Researcher of Design -&- Research Institute "Molniya" NTU "KhPI", tel.: (057) 707-68-68; e-mail: nipkimolniya@kpi.kharkov.ua..

УДК 537.528

С. А. ХАЙНАЦКИЙ

К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ В ЖИДКОСТИ

Розглянуто різні підходи до класифікації видів електричного вибуху провідників в рідині. Показано, що для опису електричних характеристик вибуху ці підходи приблизно рівнозначні. Для питомої запасеної енергії в довільному режимі отримано аналітичний вираз, вигляд якого підтверджує гіпотезу про те, що воно також є критерієм подібності. Досліджено характер впливу різних факторів на газодинаміку вибуху. Для окремих випадків встановлені параметри, вплив яких на амплітуду хвилі тиску є найбільш істотним.

Ключові слова: електричний вибух провідників, оптимальний режим, класифікація електровибуху, електророзрядний контур, параметри контуру, критерії подібності.

Рассмотрены различные подходы к классификации видов электрического взрыва проводников в жидкости. Показано, что для описания электрических характеристик взрыва эти подходы примерно равнозначны. Для удельной запасенной энергии в произвольном режиме получено аналитическое выражение, вид которого подтверждает гипотезу о том, что оно также является критерием подобия. Исследован характер влияния различных факторов на газодинамику взрыва. Для частных случаев установлены параметры, влияние которых на амплитуду волны давления наиболее существенно.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, оптимальный режим, классификация электровзрыва, параметры контура, критерии подобия.

Various approaches to the classification of types of the electrical explosion of conductors in liquid were considered. It is shown that these approaches are approximately equivalent for the purpose of description of electrical characteristics of the explosion. An analytical expression for the specific stored energy in arbitrary mode was obtained which confirmed the hypothesis that it is also a criterion of similarity. An impact of various factors on the dynamics of the explosion was studied. Parameters whose influence on the amplitude of the pressure wave was most significant were obtained for the particular cases. A mathematical model describing flows which occur during the underwater electrical explosion involves a number of correlations describing the nonlinear process of destruction of the conductor under the influence of current pulses, the process of Joule heating and expansion of plasma of discharge channel, the system of equations of hyperbolic type describing the behaviour of gas-dynamic parameters in space. The problem was solved by numerical methods.

Keywords: electrical explosion of conductors, the optimal mode, classification of the electrical explosion, parameters of the circuit, similarity criteria.

Введение. Возможность изменения характеристик электрического взрыва проводников (ЭВП) в широком диапазоне за счет регулирования электротехнических параметров источника, изменения геометрии проводника или свойств окружающей среды, делает его легко настраиваемым «инструментом», что существенно расширяет спектр его применения [1–3]. Изменение емкости конденсаторной батареи C , индуктивности разрядного контура L или начального напряжения U_0 может существенно изменить как скорость выделения энергии в процессе взрыва, так и количество выделяющейся при ЭВП энергии. Это позволяет использовать взрывающийся проводник как импульсный источник света, источник ударных волн (УВ), прерыватель импульсных токов, инструмент для получения наноматериалов с возможностью регулировать размеры частиц [4] и т.п. В этом случае актуальной становится задача нахождения параметров проволоки и контура для реализации конкретного технологического воздействия. Речь идет о классификации взрыва и инструментария для определения необходимых параметров. Важность решения этого вопроса отмечал в предисловии ко второму сборнику докладов Конференции по явлению электрического взрыва проводникового редактор В. Г. Чейс [5]. В этом же издании представлена первая работа, посвященная классификации различных типов ЭВП [6] по

целому ряду различных характеристик. Вопросы же о том, какие параметры и комплексы наиболее полно могут охарактеризовать получаемые в экспериментах по взрыву результаты, поднимались и в более ранних работах. Например, в [7,8] при исследовании электрических и оптических характеристик взрыва проводников до момента взрыва строились зависимости объемной плотности энергии W/V для проводников из различных материалов (в более поздних работах использовалась плотность энергии W/m) от плотности тока. В этих же работах впервые было предложено использовать еще одну переменную величину – так называемый «интеграл действия» $S_i = \int_0^t I^2 dt$ (I – ток в канале разряда). Эти подходы к классификации и анализу результатов активно используются и в настоящее время [9,10].

Используется также еще один подход к проблеме, основанный на применении методов размерности и подобия к исследованию ЭВП (см. [11]). В работах ряда авторов показано, что идентичные осциллограммы, характеризующиеся одинаковой фазой спада, ее глубиной и величиной вторичного импульса тока разряда, могут быть получены при различных сочетаниях параметров взрываемого проводника. Наличие идентичных электрических характеристик позволило предпо-

лагать существование подобия явления. В результате анализа массивов экспериментальных данных и физических процессов, происходящих на различных стадиях взрыва, усилиями этих авторов в итоге были получены некоторые безразмерные комплексы – критерии подобия, при сохранении которых неизменными электрические характеристики взрыва для этих стадий совпадали. Преимуществами такого подхода являются явный аналитический вид полученных выражений и возможность на их основе до опыта предсказывать вид электрических характеристик при ЭВП в различных режимах.

Целью работы является выяснение вопросов о том, как соотносятся между собой эти два подхода, основанные на анализе размерных и безразмерных комплексов, описывающих взрыв, и насколько возможно использовать их для предсказания параметров возникающих при электровзрыве течений, и, в особенности, ударных волн.

Исходные данные. Для определения влияния различных факторов и параметров электровзрыва, как «исходных» – ток, напряжение, длина проводника и т.п., так и комплексных (запасенная энергия, критерии подобия и др.) на амплитуду генерируемой взрывом ударной волны (УВ), воспользуемся широко известными экспериментальными данными, приведенными в [11] для анализа влияния изменения безразмерных критериев подобия на электрические характеристики ЭВП. Полученные в этой работе критерии включают в себя, кроме комбинации параметров разрядного контура и набора величин, характеризующих свойства материала проводника, также геометрические параметры проводников. Так, критерий Π_2 включает в себя диаметр проводника d_w

$$\Pi_2 = \frac{1}{S^2 \gamma_0 \sigma_0 (\lambda_m + \lambda_b)} \cdot \frac{C^{3/2} U_0^2}{L^{1/2}}, \quad (1)$$

а критерий Π_3 – его длину l_w :

$$\Pi_3 = \frac{Al^2}{U_0^2 \sqrt{LC}}. \quad (2)$$

Здесь γ_0 – плотность, σ_0 – удельная электропроводность, λ_m и λ_b – удельные теплоты плавления и испарения материала проводника – характеризуют индивидуальные свойства металла проводника. В (1) S – площадь сечения проводника, $S = \pi d_w^2 / 4$, в (2) $A = 10^4$ (В²·с)/м² – искровая постоянная, не зависящая от материала проводника.

Для иллюстрации влияния изменения этих параметров на характер взрыва в [11] приведены безразмерные осциллограммы тока при электрическом взрыве медных проводников, иллюстрирующие изменение фазы резкого спада тока при варьировании Π_2 за счет изменения диаметра проводника d_w (Π_3 и длина проводника l_w остаются неизменными) [11, стр. 128, рис. 41]. Из приведенных осциллограмм тока следует, что с увеличением диаметра взрываемого проводника первый максимум тока увеличивается, как и время до взрыва. При этом начальные участки роста тока совпадают с током короткого замыкания и между собой. Для иллюстрации влияния изменения Π_3 (изменяется l_w , d_w неизменно) на характер взрыва приведено еще одно семейство осциллограмм тока [11, стр. 129, рис. 42]. Показано, что на фазу взрыва изменение длины проводника влияет слабо. Третье семейство осциллограмм [11, стр. 129, рис. 43] приведено для собственно доказательства наличия подобия электрических характеристик взрыва в различных режимах при сохранении равенства одновременно и Π_2 , и Π_3 . При этом практически все размерные параметры, характеризующие режим взрыва, могут изменяться довольно существенно.

Основные электрические параметры и параметры взрываемых проводников для этих трех случаев приведены в табл. 1. В первой группе (I) под номерами от 1 до 3 приведены значения параметров при постоянных Π_3 и l_w , во второй (II) под номерами от 4 до 9 – при неизменных Π_2 и d_w . Группа параметров, обозначенных в табл. 1 как III (номера от 10 до 13), отвечает ситуации, когда приведенные кривые тока разряда подобны (т.е. практически совпадают) для различных режимов, у которых совпадают Π_2 и Π_3 .

Таблица 1 – Основные электрические параметры и параметры взрываемых проводников

		U_0 , 10 ³ В	C , 10 ⁻⁶ Ф	L , 10 ⁻⁶ Г	I_{max} , 10 ³ А	l_w , 10 ⁻³ А	d_w , 10 ⁻³ м	W_0/m , 10 ⁶ Дж/м	Π_2 , 10 ⁻¹	Π_3 , 10 ⁻²	Π_2/Π_3
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	1	14	99	3	80,4	100	0,4	86,46	36,1	2,96	122
	2	->-	->-	->-	->-	->-	0,5	55,33	14,8	->-	50
	3	->-	->-	->-	->-	->-	0,68	29,92	4,33	->-	14,6
II	4	->-	->-	10	44	20	0,5	276,7	8,1	0,065	10 ³
	5	->-	->-	->-	->-	40	->-	138,3	->-	0,259	312
	6	->-	->-	->-	->-	100	->-	55,33	->-	1,62	50
	7	->-	->-	->-	->-	140	->-	39,52	->-	3,18	25,5
	8	->-	->-	->-	->-	180	->-	30,74	->-	5,25	15,4
	9	->-	->-	->-	->-	260	->-	21,28	->-	11,0	7,39
III	10	40	3	2,26	46,1	116	0,3	32,78	5,66	3,23	17,5
	11	18	34,6	2,53	66,6	100	0,51	30,73	5,08	3,3	15,4
	12	14	99	3	80,4	100	0,66	31,76	4,87	2,96	16,5
	13	8	48	10,6	17	67	0,33	30,02	4,57	3,11	14,7

В табл. 1 U_0 – начальное напряжение на конденсаторной батарее, C – емкость конденсаторной батареи, L – индуктивность разрядной цепи, $I_{max} = U_0 / \sqrt{\frac{L}{C}}$ – максимальный ток, l_w, d_w – длина и диаметр проводника, W_0/m – отношение запасенной энергии к массе проводника, Π_2 и Π_3 – критерии подобия.

Математическая модель, описывающая возникающие при подводном электровзрыве (ПЭВ) течения, включает в себя целый ряд соотношений, описывающих сложный нелинейный процесс разрушения проводника под действием больших импульсов тока, процесс джоулевого нагрева и расширения плазмы канала разряда и т.п., включая систему уравнений гиперболического типа для описания поведения газодинамических параметров в пространстве. Такие системы уравнений не поддаются аналитическим решениям, поэтому задача решалась численными методами. Для математического описания ЭВП использовалась предложенная в [12] тепловая модель взрыва. Адиабатический нагрев проводника в модели описывается системой уравнений в безразмерных переменных

$$\begin{cases} i'' + R_0 C \omega (i r)' + i = 0; \\ \theta' = (I_m^2 R_0 / c_p m_w T_c \omega) i^2 r; \\ r = (1 - \theta)^{-n}, \end{cases} \quad (3)$$

включающей в себя уравнение разрядной RLC - цепи (R – сопротивление, Ом), уравнение теплового баланса и уравнение связи сопротивления проводника с температурой. Здесь $i = I/I_{max}$, I – разрядный ток в цепи; $r = R/R_0$; $\theta = T/T_c$, U_0 – начальное напряжение; R_0 – сопротивление при исходной температуре T_0 , °C; T_c – критическая температура; c_p, m_w – теплоемкость ($[c_p] = \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$) и масса проводника ($[m_w] = \text{кг}$). Штрихом здесь обозначена производная по $\tau = \omega t$ (t – время, $\omega = (LC)^{-1/2}$). Из системы (3) несложно исключить температуру. Объединяя второе и третье уравнения системы, можно записать $\theta' = (I_m^2 R_0 / c_p m_w T_c \omega) i^2 (1 - \theta)^{-n}$. Проинтегрировав последнее при нулевых начальных условиях ($\tau = 0, \theta(0) = \theta_0$), получим зависимость сопротивления от «интеграла действия» S_i в виде [13]

$$r = \left(1 - \Pi_2 \int_0^\tau i^2 d\tau \right)^{\frac{n}{n+1}}, \quad (4)$$

где $n \approx 3,5$ – показатель степени. Совместное решение токового уравнения системы (3) и соотношения (4) дает зависимость сопротивления проводника и тока в любой фазе взрыва проводника. Начальные условия для решения системы (3) «нулевые»:

$$r(0) = 1, \quad i(0) = 0, \quad \theta(0) = \theta_0. \quad (5)$$

Для «индивидуализации» течения жидкости необходимо связать решения задачи о взрыве проводника с задачей о течении путем определения условий на контактном разрыве. Для этого используем уравнение, описывающее перемещение поверхности проводника при тепловом расширении. Радиальное тепловое рас-

ширение проводника линейно зависит от температуры, $a = a_0(1 + \alpha T)$, поэтому скорость расширения (при $\alpha = \text{const}$, где α – линейный коэффициент теплового расширения, a – радиус проводника) будет равна

$$a' = \Pi_a i^2 r, \quad (6)$$

где $\Pi_a = \alpha I_m^2 R_0 / c_p m \omega$. Здесь мы использовали баланс энергии из системы (4) для исключения температуры. Решение системы (3) в модифицированном с помощью (6) виде, и при наличии (5), дает закон теплового расширения проводника, необходимый для детализации течения при подводном электровзрыве проводников.

Плазменная («дуговая») стадия подводного электровзрыва может быть описана в рамках модели, разработанной в [14]. Баланс энергии для канала разряда в этом случае записывается в виде [15]:

$$(\gamma_a - 1)^{-1} (\tilde{P} F)' + \tilde{P} F' = 2 \Pi_a i^2 r / \pi, \quad (7)$$

где \tilde{P} , F , i , r – безразмерные давление, сечение, ток и сопротивление канала разряда, соответственно:

$$F = S/S_{ef}, \quad \tilde{P} = P/P_{ef}, \quad S = \pi a^2; \quad S_{ef} = \pi U_0^2 (C/\omega^2 \gamma_0 l)^{1/2};$$

$P_{ef} = \gamma_0 S_{ef} \omega^2 / 2\pi$. Для определения электрического сопротивления канала разряда используется экспериментально установленное соотношение [11]

$$r = \frac{A I (\gamma_a - 1) (\tilde{P} F)^{-1}}{R_0 P_{ef} S_{ef}}. \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) совместно с токовым уравнением из (3) образуют систему уравнений для определения граничных условий, используемых для решения краевой задачи. Начальные условия при этом выбираются «естественные» – радиус канала разряда, поле давлений и скоростей в расчетной области известны к моменту «переключения» проводник – канал разряда.

Система нестационарных уравнений газовой динамики с одной пространственной переменной в дифференциальной форме (в переменных Эйлера) имеет вид [16]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} (x^\nu \gamma) + \frac{\partial}{\partial x} (x^\nu \gamma u) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial t} (x^\nu \gamma u) + \frac{\partial}{\partial x} (x^\nu (p + \gamma u^2)) = \nu x^{\nu-1} p; \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[x^\nu \gamma \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[x^\nu \gamma u \left(\varepsilon + \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2} \right) \right] = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где x, t – эйлеровы координаты; γ – плотность; ε – удельная внутренняя энергия газа; p – давление; показатель $\nu = 0$ в случае плоской, $\nu = 1$ в случае цилиндрической и $\nu = 2$ сферической симметрии течения. Течения, возникающие при ПЭВП, как правило, обладают цилиндрической симметрией, поэтому в дальнейшем мы будем считать $\nu = 1$. Для однозначного описания течения система (9) дополняется уравнением состояния жидкости в форме Тейта

$$P = G \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^\lambda - B, \quad (10)$$

где G, χ, B – константы. Начальные условия для системы (9) имели вид $P(0, x) = P_{ex}, u(0, x) = 0, a_0 < x < x_b$, где x_b – радиус цилиндра (расчетной области). На поверхности проводника (канала) и на границе расчетной области ставились граничные условия непротекания. Проводник располагался соосно с жесткой цилиндрической оболочкой диаметром 11 мм.

Для нахождения решения системы (3) использовалась формула коррекции для одномерного случая в сочетании с методом Рунге-Кутты, используя на каждом шаге прямые итерации. Интегрирование уравнений системы на малом временном интервале Δt проводилось по искусственным формулам коррекции, получаемым из интерполяционных соотношений. Учитывая малость Δt , для интегрирования функций использовалась формула

трапеций, произведения функций интегрировались по искусственным формулам.

Система уравнений (9) – (10) с начальными и граничными условиями решалась конечноразностным методом С. К. Годунова [16]. Тестирование модели проводилось путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными [17].

Обсуждение результатов. Некоторые результаты расчета взрыва проводников в воде при указанных в табл. 1 параметрах контура и проводника, приведены в табл. 2. Нумерация строк и групп параметров соответствует нумерации в табл. 1 – например, в строке 1 приведены результаты расчета ПЭВ с параметрами, указанными в табл. 1, строка 1.

Таблица 2 – Результаты расчета взрыва проводников в воде

		$P_a,$ 10^9 Па	$N_{max},$ 10^9 Вт	$N_{max}/l_w,$ 10^9 Вт/м	$I_{ex},$ 10^3 А	I_{ex}/I_{max}	$S_i,$ 10^3 А ² с	$t_{ex},$ 10^{-6} с	$\frac{t_{ex}}{\pi\sqrt{LC}}$	$W_{ex},$ Дж	$W_{ex}/m,$ 10^6 Дж/кг
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	1	0,260	5,89	58,9	40	0,498	6,05	9,89	0,183	672	5,990
	2	0,298	6,29	62,9	52,6	0,654	14,8	13,5	0,250	1047	5,969
	3	0,339	6,13	61,3	71,3	0,886	50,5	21,7	0,400	1945	5,997
II	4	0,240	0,57	28,4	35,7	0,810	14,8	30,2	0,305	210	5,995
	5	0,237	1,16	28,9	35,4	0,804	14,8	30,3	0,306	421	6,015
	6	0,227	2,54	25,4	34,5	0,784	14,8	30,6	0,310	1050	5,989
	7	0,221	3,80	27,1	33,93	0,770	14,8	30,9	0,312	1479	6,026
	8	0,225	4,45	24,7	33,4	0,758	14,8	31,1	0,315	1898	6,012
	9	0,202	5,90	22,7	38,1	0,729	14,8	31,6	0,320	2737	6,003
	10	0,218	10,3	88,6	38,6	0,838	1,91	2,94	0,359	438	5,979
III	11	0,301	6,98	69,8	57,0	0,857	16,0	11,0	0,375	1095	6,004
	12	0,337	6,27	62,7	69,7	0,867	44,8	20,6	0,381	1835	6,008
	13	0,133	7,70	11,5	14,9	0,867	28,0	27,7	0,392	307	6,008

Здесь P_a – давление на стенке в момент прихода ударной волны, N_{max} – максимальная мощность, N_{max}/l_w – максимальная мощность на единицу длины канала, I_{ex} – значение тока в момент взрыва, I_{ex}/I_{max} – относительное («приведенное») значение тока в момент взрыва, S_i – «интеграл действия», t_{ex} – время взрыва, $\frac{t_{ex}}{\pi\sqrt{LC}}$ – «приведенное» время взрыва, W_{ex} –

энергия, выделившаяся в проводнике к моменту взрыва, W_{ex}/m – отношение энергии, выделившейся в проводнике к моменту взрыва, к массе проводника.

Сопоставляя результаты расчета взрыва проводников, представленные в табл. 2, с исходными электрическими параметрами и параметрами взрываемых проводников (табл. 1), можно отметить и соответствие их в некоторых случаях, и полное несоответствие в других. Рассмотрим для начала, как это проявляется для отдельных групп параметров.

Группа I. При неизменных параметрах контура и критерия Π_3 («отвечающего» за дуговую стадию разряда [11]) уменьшаем критерий Π_2 за счет роста диаметра проводника. При этом уменьшаются также W_0/m и Π_2/Π_3 . Давление P_a растет, как и все остальные измеряемые параметры, представленные в табл. 2. Можно было бы сделать вывод, что первопричиной этого является увеличение диаметра проводника, если не предположить, что изменение тех параметров, кото-

рые в этом опыте были зафиксированы, может привести к другим результатам.

Группа II. Здесь мы увеличиваем Π_3 за счет увеличения длины проводника, все остальные параметры зафиксированы. Опять синхронно уменьшаются W_0/m и Π_2/Π_3 . Давление в целом по группе параметров с увеличением длины проводников падает. Выпадает из общего тренда только режим №8. Обращает на себя внимание тот факт, что при увеличении длины проводника в 13 раз давление уменьшается не больше чем на 16 %. Максимальная мощность с увеличением длины проводника растет, а мощность на единицу длины проводника в целом немного снижается. Все остальные измеряемые параметры либо незначительно растут, либо остаются неизменными. Следует также обратить внимание на то, что в этой группе представлен проводник (6), геометрические параметры которого совпадают с №2 (группа I), а из электрических отличается только значение индуктивности контура. Расчетное давление для проводника из первой группы ($L = 3 \cdot 10^{-6}$ Г) существенно больше, чем для проводника из второй группы ($L = 10^{-5}$ Г), что позволяет судить о влиянии временного фактора на величину давления при ПЭВ.

Группа III. Это группа параметров, при которых токовые характеристики ПЭВ подобны при большой разнице, как в геометрических параметрах проводников, так и в параметрах контура [11]. Здесь также

можно отметить большой разброс в поведении давления – от № 10 к № 12 рост (до 35 %), и существенно меньшее (в $1,6 \div 2,5$ раз) значение для №13. Причем значения N_{max} для этих параметров близки, а N_{max}/l_w существенно меньше как раз для № 13. Для этого же режима наибольшее в группе время взрыва и наименьшее значение энергии, выделившейся в проводнике к моменту взрыва. Возможно, эти особенности взрыва могут быть связаны с тем, что в этом режиме начальное напряжение минимально, относительно велики емкость и индуктивность – т.е. одновременно «срабатывают» несколько факторов. Так или иначе, но невозможность выделить в 3 группе основной фактор или группу факторов, ответственных за такой характер поведения расчетного давления при изменении всех параметров, свидетельствует о том, что является действительно многофакторным, и связать все эти факторы воедино пока не представляется возможным.

В целом, из приведенных в табл. 1 расчетных и измеряемых параметров относительно хорошо коррелируют со значением давления на стенке камеры значения N_{max} , N_{max}/l_w , критериев Π_2 , Π_3 , их отношения Π_2/Π_3 и W_0/m . Для предварительных оценок характеристик взрыва эти параметры применяются давно, причем, как уже указывалось, некоторые из них являются критериями подобия. Вопрос возникает только по правомерности использования для этих целей отношения W_0/m . Нам известно [18], что для оптимальных режимов электровзрыва отношение $(W_0/m)_{opt}$ зависит только от свойств металла проводника, т.е. является инвариантным по отношению к параметрам разрядного контура и размерам проводников

$$\left(\frac{W_0}{m}\right)_{opt} = \sqrt{10^2 A} \cdot \left[\frac{\sigma_0 \cdot (\lambda_m + \lambda_b)}{8\pi^2 \gamma_0}\right]^{1/2}. \quad (11)$$

Рассмотрим выражения для экспериментально определенных критериев подобия электрических характеристик взрыва проводников(1). Если взять отношение второго критерия подобия Π_2 (1), характеризующего непосредственно фазу взрыва, к Π_3 (2), больше относящегося к дуговой стадии разряда, то

несложно получить $\frac{\Pi_2}{\Pi_3} = \frac{4}{A} \left(\frac{W_0}{m}\right)^2 \frac{\gamma_0}{\sigma_0 (\lambda_m + \lambda_b)}$. Используя (11), получаем

$$\frac{W_0}{m} = \frac{\pi\sqrt{2}}{10} \left(\frac{W_0}{m}\right)_{opt} \left(\frac{\Pi_2}{\Pi_3}\right)^{1/2} \quad (12)$$

зависимость W_0/m для произвольного режима взрыва проводника, включающую в себя отношение критериев подобия и постоянную для данного металла величину $(W_0/m)_{opt}$. Из (12) следует, что отношение запасенной энергии к массе проводника для любого режима ПЭВ, несмотря на то, что это размерная величина, может рассматриваться как критерий подобия электрических характеристик взрыва проводника, поскольку включает в себя отношение известных критериев и величину $(W_0/m)_{opt}$, зависящую только от свойств материала проводника.

Выводы. Нами установлено, что применение всех рассмотренных в работе подходов для классификации видов электровзрыва проводников примерно равнозначно и правомерно. Применение подхода с использованием критериев подобия для предсказания характера взрыва, на наш взгляд, более «технологично», поскольку они записаны в явном аналитическом виде. Наши оценки показали, что повсеместно использованный ранее подход к классификации с использованием удельной энергии также оправдан. Нами получено подтверждение, что отношение W_0/m также является критерием подобия, записанном в размерном виде.

Применение рассмотренных подходов к предсказанию газодинамических характеристик взрыва носит ограниченный характер. Из результатов работы видно, что это возможно в частных случаях, когда при фиксации всех остальных параметров изменяется какой-либо один. В целом можно высказать предположение, что существенное влияние на газодинамические характеристики взрыва могут оказать влияние те параметры, изменение которых приводит к сильным изменениям электрических характеристик.

Список литературы:

1. Бурцев В. А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В. А. Бурцев, Н. В. Калинин, А. В. Лучинский. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
2. Русских А. Г. Исследование электрического взрыва проводников в зоне высокого давления сходящейся ударной волны / А. Г. Русских, В. И. Орешкин, А. Ю. Лабецкий, С. А. Чайковский, А. В. Шишлов // ЖТФ. – 2007. – Т. 77, В. 5. – С. 35-40.
3. Савенков Г. Г. Электрический взрыв проводника в энергоаккумулирующих фазовых материалах с наноразмерными полупроводящими добавками / Г. Г. Савенков, В. А. Морозов, А. А. Лукин // Письма в ЖТФ. – 2016, В. 22–С. 23-28.
4. Волков Н. Б. Механизмы генерации наноразмерных металлических частиц при электрическом взрыве проводников / Н. Б. Волков, А. Е. Майер, В. С. Седой, Е. Л. Фенько, А. П. Яловец // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, В. 4. – С. 77-80.
5. Электрический взрыв проводников. – М.: Мир, 1965. – С. 47-95.
6. Уэбб Ф. Электрические и оптические характеристики быстрого взрыва проволочек / Ф. Уэбб, Г. Хилтон, П. Левин, Э. Толлестрон // Электрический взрыв проводников. – М.: Мир, 1965. – С. 47-95.
7. Такер Т. Электрический взрыв тонких проволочек в разрядной системе с коаксиальным кабелем / Т. Такер, Ф. Нейлсон // Взрывающиеся проволочки. – М.: ИЛ, 1963. – С. 67-74.
8. Андерсон Г. Применение понятия «интеграл действия» в исследованиях взрывающейся проволочки / Г. Андерсон, Ф. Нейлсон // Взрывающиеся проволочки. – М.: ИЛ, 1963. – С. 88-94.
9. Орешкин В. И. Численные исследования интеграла удельного действия тока при электрическом взрыве проводников / В. И. Орешкин, С. А. Баренгольц, С. А. Чайковский // ЖТФ. – 2007. – Т. 77, В. 5. – С. 108-116.
10. Khainatskiy S. A. Investigations on optimal mode of electric explosion of conductors in water and air / S. A. Khainatskiy // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2009. – Vol. 45, No 5. – P. 397-403.
11. Кривицкий Е. В. Динамика электровзрыва в жидко-

сти / Е. В. Кривицкий. – К.: Наукова думка, 1986. – 206 с.

12. Кривицкий Е. В. О механизме электрического взрыва проводников / Е. В. Кривицкий, С. А. Хайнацкий // Техническая электродинамика. – 1982. – № 4 – С. 22-28.

13. Хайнацкий С. А. Исследование зависимости сопротивления взрывающегося проводника от «интеграла действия» в различных моделях электровзрыва / С. А. Хайнацкий // Физические основы электрического взрыва. – К.: Наукова думка, 1983. – С. 65-73.

14. Кривицкий Е. В. О подобии подводных искровых разрядов / Е. В. Кривицкий, В. В. Шамко // Журнал технической физики – 1972. – Т. 42, В. 1. – С. 83-87.

15. Кривицкий Е. В. Исследование влияния начальных условий на динамику развития канала подводной искры / Е. В. Кривицкий, В. Д. Кустовский, А. П. Сливинский // Журнал технической физики. – 1980. – Т. 42, В. 8. – С. 1713-1716.

16. Рождественский Б. Л. Системы квазилинейных уравнений / Б. Л. Рождественский, Н. Н. Яненко. – М.: Мир, 1978. – 687 с.

17. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С. К. Годунова. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

18. Шамко В. В. Газодинамические особенности комбинированных электровзрывных источников / В. В. Шамко, С. А. Хайнацкий // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1988. – № 4 (142). – С. 51-54.

19. Khainatskiy S. A. Conditions for realization of an optimum regime of the electric explosion of conductors in liquid media / S. A. Khainatskiy // Technical Physics Letters. – 2009. – Vol. 35, № 4. – P. 299-301.

References (transliterated):

1. Burcev V., Kalinin N., Luchinskiy A. Jelektricheskij vzryv provodnikov i ego primeneniye v jelektrifizicheskikh ustanovkakh. Moscow: Jenergoatomizdat, 1990. 288 p.

2. Russkikh A., Oreshkin V., Labetskij A., Chaikovskij S., Shilov A. Issledovaniye jelektricheskogo vzryva provodnikov v zone vysokogo davleniya shodjashhejsya udarnoy volny. Zhurnal Technicheskoy Fiziki 77.5: 2010. p. 35-40.

3. Savenkov G., Morozov V., Lukin A. Elektricheskij vzryv provodnika v energoakkumuliruyushchikh fazovykh materialakh s nanorazmernymi poluprovodyashchimi dobavkami. Pis'ma v Zhurnal Technicheskoy Fiziki. 22: 2016. pp. 23-28.

4. Volkov N., Mayer A., Sedoy V., Fen'ko E., Yalovets A. Mekhanizmy generatsii nanorazmernykh metallicheskikh chas-tits pri elektricheskom vzryve provodnikov. Zhurnal Technicheskoy Fiziki 80.4: 2010. pp. 77-80.

5. Elektricheskij vzryv provodnikov. Moscow: Mir. 1965. pp. 47-95.

6. Ujebb F., Khilton G., Levin P., Tollestrop E. Jelektricheskije i opticheskie harakteristiki bystrogo vzryva provolochek. Jelektricheskij vzryv provodnikov. Moscow: Mir. 1965. pp. 47-95.

7. Taker T., Neylson F. Elektricheskij vzryv tonkikh provolochek v razryadnoy sisteme s koaksial'nym kabelem. Vzryvayushchiesya provolochki. Moscow: Mir. 1963. pp. 67-74.

8. Anderson G., Neylson F. Primeneniye ponyatiya «integral deystviya» v issledovaniyakh vzryvayushchiesya provolochki. Vzryvayushchiesya provolochki. Moscow: Mir. 1963. pp. 88-94.

9. Oreshkin V., Barenol'ts S., Chaykovskiy S. Chislennyye issledovaniya integrala udel'nogo dejstviya toka pri jelektricheskomy vzryve provodnikov. Zhurnal Technicheskoy Fiziki 77.5. 2007. pp. 108-116.

10. Khainatskiy S. A. Investigations on optimal mode of electric explosion of conductors in water and air Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 45.5: 2009. pp. 397-403.

11. Krivickij E. Dinamika jelektrivzryva v zhidkosti. Kyiv: Naukova dumka. 1986. 206 p.

12. Krivickij E., Khaynatskiy S. O mekhanizme elektricheskogo vzryva provodnikov. Tekhnicheskaya elektrodinamika. 4. 1982. pp. 22-28.

13. Khaynatskiy S. Issledovaniye zavisimosti soprotivleniya vzryvaemogo provodnika ot «integrala deystviya» v razlichnykh modelyakh jelektrivzryva. Fizicheskie osnovy elektricheskogo vzryva. Kyiv: Naukova dumka: 1983. pp. 65-73.

14. Krivitskiy E., Shamko V. O podobii podvodnykh iskrovykh razryadov. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki 42.1. 1972. pp. 83-87.

15. Krivitskiy E., Kustovskiy V., Slivinskiy A. Issledovaniye vliyaniya nachal'nykh usloviy na dinamiku razvitiya kanala podvodnoy iskry. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 42.8: 1980. pp. 1713-1716.

16. Rozhdstvenskiy B., Yanenko N. Sistemy kvazi-lineynykh uravneniy. Moscow: Mir. 1978. 687 p.

17. Chislennoe resheniye mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki. Pod red. S. K. Godunova. Moscow: Nauka. 1976. 400 p.

18. Shamko V., Khaynatskiy S. Gazodinamicheskie osobennosti kombinirovannykh jelektrivzryvnykh istochnikov. Izvestiya AN SSSP. Mekhanika zhidkosti i gaza: 4.142. 1988. pp. 51-54.

19. Khainatskiy S. Conditions for realization of an optimum regime of the electric explosion of conductors in liquid media. Technical Physics Letters 35.4: 2009. pp. 299-301.

Послунута (received) 19.01.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

До питання про класифікацію електричного вибуху провідників в рідині / С. А. Хайнацкий // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2017. – № 15 (1237). – С. 92-97. – Бібліогр.: 19 назв. – ISSN 2079-0740.

К вопросу о классификации электрического взрыва проводников в жидкости / С. А. Хайнацкий // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2017. – № 15 (1237). – С. 92-97. – Бібліогр.: 19 назв. – ISSN 2079-0740.

On the classification of electrical explosion of conductors in liquid / S. A. Khainatskiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 92-97. – Bibliogr.: 19. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хайнацкий Сергій Олександрович – науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (095) 664-90-70; email: Khainatskiy@mail.ru.

Хайнацкий Сергей Александрович – научный сотрудник; Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, тел.: (095) 664-90-70; email: Khainatskiy@mail.ru.

Khainatskiy Sergey Aleksandrovich – Researcher; Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (095) 664-90-70; email: Khainatskiy@mail.ru.

УДК 519.2

С.П. ШАЛАМОВ**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ**

Наведено конструкції полеутворюючих систем придатних до генерування імпульсного електромагнітного поля, що задовольняє вимогам процедури NRS03 стандарту НАТО STANAG АЕСТР- 500. Розглянуті вимоги до форми імпульсу електромагнітного поля і до геометричних параметрів робочої зони полеутворюючої системи залежно від габаритів випробовуваного виробу. Представлені результати розрахунку процесу поширення електричного поля в робочій зоні полеутворюючої системи, з урахуванням впливу можливої нерівності заземленої поверхні.

Ключові слова: STANAG АЕСТР-500, TEM камера, GTEM камера, відкритий випробувальний майданчик, імпульсне електромагнітне поле.

Приведены конструкции полеобразующих систем пригодных для генерирования импульсного электромагнитного поля в соответствии требованиям процедуры NRS03 стандарта НАТО STANAG АЕСТР-500. Рассмотрены требования к форме импульса электромагнитного поля и к геометрическим параметрам рабочей зоны полеобразующей системы в зависимости от габаритов испытываемого изделия. Представлены результаты расчета процесса распространения электрического поля в рабочей зоне полеобразующей системы, с учетом влияния возможной неровности заземленной поверхности.

Ключевые слова: стандарт STANAG АЕСТР-500, TEM камера, GTEM камера, открытая испытательная площадка, импульсное электромагнитное поле.

The electromagnetic compatibility is becoming more challenging with the development of new electronic products and technologies. Test procedures related to electromagnetic compatibility continue to be introduced and updated on a regular basis. This article is dedicated to electromagnetic compatibility according to STANAG АЕСТР-500 "Electromagnetic Environmental Effects. Test and Verification". This application note is trying to give an overview of test device such as a TEM cell, GTEM cell, open area test site and show their respective advantages and disadvantages. Test sites examples are presented. Configure the test equipment is presented. Tolerances and characteristics of the pulsed field limit are described. This article considers a pulse propagating down a transmission line and describes a study of the effects that curvature has on electromagnetic wave.

Keywords: STANAG АЕСТР-500, TEM cell, GTEM cell, open area test site, pulsed electromagnetic field.

Введение. В связи с широким распространением микроэлектроники и микропроцессорной техники в различных областях техники, проблема устойчивости технических средств к действию деструктивных электромагнитных полей становится все более актуальной. Деструктивные явления могут проявляться в виде обратимых и необратимых нарушений и повлечь за собой серьезные последствия. Источники помех могут носить естественный и искусственный характер. Наиболее опасными из естественных источников помех является разряды молнии. Наиболее мощным источником искусственных электромагнитных помех является электромагнитный импульс, возникающий при ядерных взрывах (ЭМИ ЯВ).

Цель статьи. Целью данной статьи является определение допустимых характеристик полеобразующей системы, удовлетворяющей требованиям процедуры NRS03 стандарта НАТО STANAG АЕСТР-500:2016 [1] и оценка путей реализации.

Актуальность темы и анализ последних достижений. ЭМИ ЯВ является одним из самых мощных источников помех, поэтому, в научной литературе уделяется много внимания способам защиты оборудования от деструктивного воздействия ЭМИ ЯВ. Деструктивное воздействие удаленного ядерного взрыва на электронную аппаратуру было обнаружено при первых испытаниях. В 1962 году (22 октября, 28 октября и 1 ноября) в Советском Союзе была произведена се-

рия из трех высотных ядерных взрывов, каждый мощностью в 300 кт (К3-184; К4-187 и К5-195), направленных на изучение явления ЭМИ ЯВ. Во время одного из тестов (К3-184) были зафиксированы импульсные токи до 3400 А в проводах воздушных телефонных линий, которые обусловили появление импульсного напряжения с амплитудой до 28 кВ, срабатывание всех установленных в аппаратуре разрядников и перегорание всех предохранителей, что сопровождалось прекращением работы системы связи, зафиксировано повреждение систем радиосвязи на расстоянии 600 км от эпицентра взрыва, выход из строя радиолокатора, расположенного на расстоянии 1000 км, повреждения трансформаторов и генераторов на электростанциях, пробой изоляторов ЛЭП. Поскольку аппаратура поколения 60-х годов выполнялась на электромеханических элементах и радиолампах, она была более устойчива к воздействию преднамеренных электромагнитных деструктивных воздействий, чем современная микроэлектронная и микропроцессорная техника [2].

В технической литературе преднамеренные электромагнитные деструктивные воздействия (ПЭДВ) называются «High Power Electromagnetic Threats (НРЕМ)» и подразделяются на два вида: высотный электромагнитный импульс ядерного взрыва – «High-Altitude Electromagnetic Pulse (НЕМР)» и преднамеренно излучаемые электромагнитные помехи (ПИЭМ) – «Intentional Electromagnetic Interference (ИЕМИ)». Существует значительное число стандартов, разработанных

ных по этой тематике такими организациями, как Международная Электротехническая Комиссия (МЭК), специальная комиссия при Конгрессе США, Европейские нормы, общество IEEE. Среди стандартов, разработанных Министерством обороны США и НАТО занимают особое место MIL-STD-461G [3] и NATO AECTP-500:2016 [1]. Эти стандарты предъявляют требования к испытательному оборудованию и методике проведения испытаний на все возможные виды электромагнитных воздействий.

Разработкой оборудования для тестирования на устойчивость объектов к воздействию импульсного электромагнитного излучения занимается более 35 организаций в разных странах, в том числе: Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Новосибирск, Россия), Всероссийский научно-исследовательский центр ВЭИ (ВНИЦ ВЭИ г. Москва, Россия), Техасский технический университет (г. Лаббок, США), Исследовательский центр ядерной физики SOREQ (г. Явне, Израиль), Северо-западный Институт ядерных технологий (г. Сиань, Китай). Среди такого рода оборудования присутствуют и установки для генерации ЭМИ ЯВ, представленные на рис. 1, 2.



Рисунок 1 – Стационарный имитатор ЭМИ ЯВ «Аллюр» ФГУП ВЭИ (г. Истра, Московской обл.). Габариты имитатора: 100 x 35 x 13,5 м; рабочий объем: 10×10×10 м; форма импульса: 2,5/25 нс; максимальная напряженность импульса электрического поля: 70 кВ/м

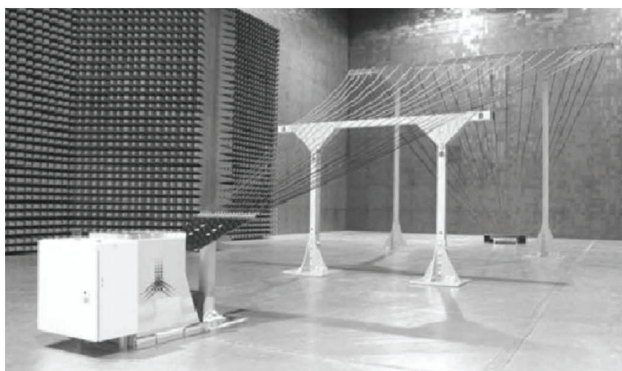


Рисунок 2 – Испытательный стенд, производимый компанией Montena Technology (США) для лабораторных испытаний крупных объектов

Форма импульса электрического поля, в соответствии с требованиями стандарта NATO AECTP-500:2016 [1], приведена на рис. 3, и описывается следующим выражением:

$$\begin{cases} E(t) = 0, t \leq 0; \\ E(t) = E_0 \times k(e^{-at} - e^{-bt}), t \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

В формуле (1) константы имеют следующие значения: $E_0 = 5 \times 10^4$ В/м, $k = 1,3$, $a = 4 \times 10^7$ с⁻¹, $b = 6 \times 10^8$ с⁻¹.

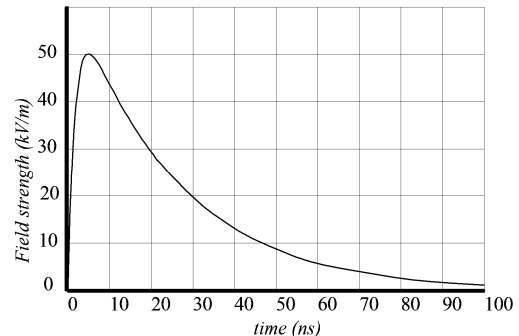


Рисунок 3 – Форма импульса электрического поля

Стандарт позволяет использовать различные варианты полеобразующих систем, например ТЕМ камеры или открытые полосковые линии. Однако геометрические размеры объекта не должны превышать размер рабочей зоны (usable volume) полеобразующей системы, размеры которой не превышают ($H/3$, $B/2$, $A/2$), как показано на рис. 4. Рекомендовано, чтобы неоднородность поля в рабочей зоне не превышала 3 dB. Объект испытаний должен находиться на диэлектрической подставке, которая минимально искажает поле. Если испытательное оборудование расположено на заземленной плоскости в реальной установке, при испытаниях рекомендовано оборудование также располагать на заземленной плоскости полеобразующей системы. Объект испытаний должен быть связан с землей таким образом, чтобы повторять реальную установку. Испытательная площадка должна давать возможность подключить к объекту испытаний кабели для работы и мониторинга состояния. Потенциальная пластина полеобразующей системы располагается таким образом, чтобы расстояние до ближайшей заземленной поверхности был не менее $2 \times h$, где h - высота полеобразующей системы. Рекомендуется выдержать также объект испытания при относительной влажности воздуха менее 50 % в течение 24 часов. Влага из воздуха может конденсироваться на поверхности образца, в результате чего образуется частично проводящий слой, который может защитить объект испытаний во время воздействия на него электромагнитного поля. При длительном нахождении объекта в среде с низкой влажностью, образование частично проводящего слоя невозможно [1].

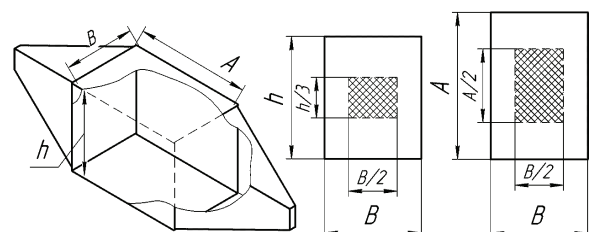


Рисунок 4 – Геометрические параметры полезного объема полеобразующей системы

Генерация и измерение радиочастотного поля в диапазоне частот выше 3 ГГц обычно является дорогостоящим и трудоемким мероприятием и связано это с необходимостью использования открытых измерительных площадок, экранированных безэховых камер, ГТЕМ или ТЕМ ячеек. Каждый способ имеет свои достоинства и недостатки. Открытые измерительные площадки подвержены атмосферному воздействию и внешним помехам. Внешние поля создают дополнительные погрешности при измерениях. Атмосферные условия могут оказать влияние на искажение первоначальной формы волны электромагнитного поля. Однако, когда требуется подвергнуть воздействию объекты со значительными габаритами, очевидно, что открытые площадки являются единственным возможным вариантом.

Еще в 1974 году М.Л. Кроуфорд [4] описал ТЕМ камеру (Transverse Electromagnetic Mode). Это расширенная плоская линия передачи, работающая в режиме ТЕМ, для имитации плоской волны электромагнитного поля в свободном пространстве. Со временем конструкция ТЕМ камеры была переработана. В 1987 году Д. Кенигстейном и Д. Хансеном была создана ГТЕМ камера (Gigahertz Transverse Electro-Magnetic test cell – испытательная камера плоской электромагнитной волны гигагерцового диапазона частот), которая преодолела многие ограничения ТЕМ камеры. Конструкция ГТЕМ камеры представлена на рис. 5. Что касается перспектив использования ГТЕМ камер то в [5, 6] описан измерительный комплекс с использованием ГТЕМ камер для испытаний на ЭМС. Для создания плоской волны ЭМИ формой, описанной выражением (1), ТЕМ или ГТЕМ камера должна передавать без искажений по амплитуде и фазе весь частотный спектр ЭМИ.

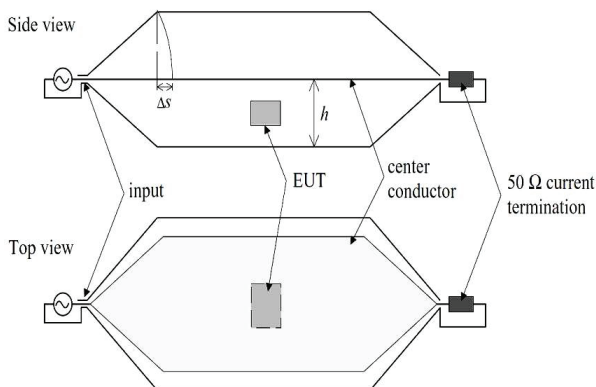


Рисунок 5 – Принципиальная схема ГТЕМ-камеры

Для создания в рабочей зоне ТЕМ камеры заданного уровня электромагнитного поля, требуемая входная мощность является намного ниже, чем в случае использования антенн в безэховых камерах. Это обстоятельство является преимуществом ТЕМ и ГТЕМ камер по отношению к антенным системам. Недостатком ТЕМ камер является ограниченный частотный диапазон, обусловленный тем, что элементы конструкции ячейки имеют различную форму. Из-за углов перехода длина внутреннего и внешнего проводника отличаются, поэтому вдоль внешнего проводника

время прохождения волны больше: $\Delta t = \Delta S/c_0$. [4].

Существует множество публикаций, посвященных обсуждению результатов расчета электромагнитных полей, образованных внутри ТЕМ и ГТЕМ камер. В случае применения открытых измерительных площадок, в отличие от ТЕМ и ГТЕМ камер, необходимо учитывать влияние посторонних заземленных предметов, неровность заземленной плоскости, учесть геометрические соотношения полеобразующей системы для создания поля в рабочей зоне с рекомендуемой неоднородностью менее ± 3 dB [1].

Выбор геометрических соотношений полеобразующей системы.

Постановка задачи. Геометрия расчетной области, свойства среды и параметры, характеризующие источники поля, неизменны в направлении оси z на схеме рис. 6. Рассматривается сечение моделируемого объекта, бесконечно протяженного в плоскость чертежа. Решается электростатическая задача, описываемая уравнением Пуассона относительно скалярного электрического потенциала φ : $E = -\text{grad } \varphi$. Уравнение имеет вид [7]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = -\rho, \quad (2)$$

где ϵ_x, ϵ_y – компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды; ρ – плотность распределенного заряда.

Величины $\epsilon_x, \epsilon_y, \rho$ являются постоянными в пределах модели. Источником поля является электрический заряд, равномерно распределенный по поверхности. Среда – воздух. Условие Дирихле задает известное значение электрического потенциала на элементе модели potential. Расчеты проведены с помощью программного обеспечения Comsol Multiphysics 5.1, основанного на методе конечных элементов. Результаты расчета представлены в виде уровней равной напряженности и распределения напряженности электрического поля вдоль выбранных линий. Схематически расчетная область и линии, вдоль которых происходит построения графиков, представлены на рис. 6.

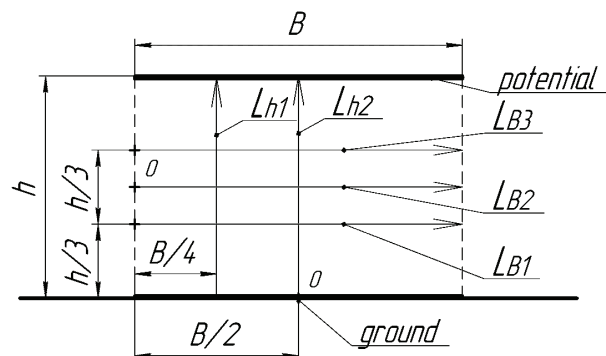


Рисунок 6 – Расчетная область и схема построения графиков

На рис. 6 приняты такие обозначения: h – расстояние между потенциальной и заземленной пластиной; B – ширина потенциального электрода. Линии, вдоль которых строятся графики: $L_{B1}, L_{B2}, L_{B3}, L_{h1}, L_{h2}, L_{h3}$.

Результаты расчета представлены на рис. 7, 8.

Обозначение графиков на рис. 7 в согласии со схемой, приведенной на рис. 6. Напряженность электрического поля представлена в относительных единицах.

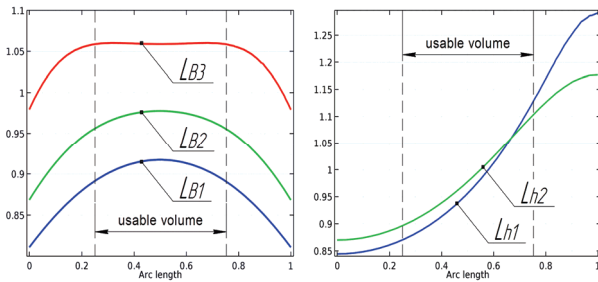


Рисунок 7 – Распределение электрического поля в рабочей зоне полеобразующей системы с соотношением $h/B = 1$

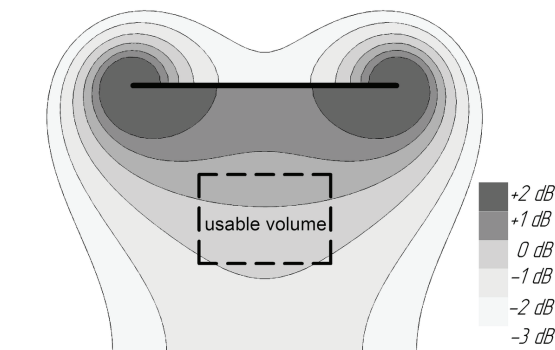


Рисунок 8 – Распределение электрического поля в рабочей зоне полеобразующей системы с соотношением $h/B = 1$

Неоднородность поля рабочей зоны при отношении $h/B = 1$ не более $+1/-2$ dB. При соотношении h/B более 2, неоднородность поля в рабочей зоне составляет более -3 dB.

Влияние неровностей заземленной плоскости на распределение поля в рабочем объеме полеобразующей системы. Любая поверхность имеет неровности, которые в определенной мере влияют на распространение электромагнитных волн. Существует множество публикаций, освещающих данный вопрос, при этом рассматриваются такие эффекты, как отражение, интерференция, дифракция, рассеяние, атмосферная рефракция. Все эти эффекты справедливо рассматривать, когда речь идет о распространении радиоволн над поверхностью земли с учетом больших расстояний. В общем случае учесть влияние неровностей земли не представляется возможным. Для расчетов напряженности поля в каждом случае необходимо построить профиль поверхности и производить расчет. Для определения требований к заземленной поверхности полеобразующей системы достаточно будет оценить влияние неровностей на распределение электромагнитного поля в рабочей зоне системы. Обычно в технических заданиях на изготовление ТЕМ или ГТЕМ камер указывается максимально допустимая погрешность 3 %, что справедливо и для открытого испытательного полигона. Проведение процедуры метрологической аттестации межэлектродного расстояния ТЕМ камеры представлена в [6].

Постановка задачи. Рассматривается импульс

электромагнитного поля, распространяющийся в пространстве между двумя проводящими плоскостями. Пространство между плоскостями заполнено воздухом. Модель для расчета схематично показана на рис. 9. На одном конце структуры находится сосредоточенный порт (*lumped port*), который возбуждает структуру. На порт подается сигнал возбуждения как ток с амплитудой $i(t) = u(t)/Z$, где Z является указанным характеристическим импедансом между генератором напряжения и моделью. На поверхности модели *electric conductor* применяется граничное условие *perfect electric conductor*, так как не учитываются потери в проводниках. Скин-эффект также в расчет не принимается.

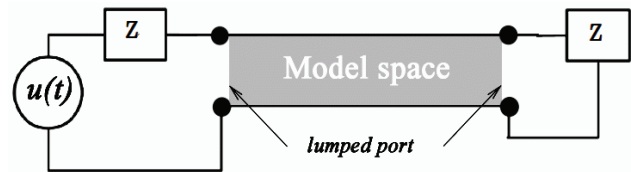


Рисунок 9 – Модель для расчета ТЕМ процесса

Сигнал, который подается на входной порт, описывается выражением (2).

$$u(t) = \frac{1}{1 + \exp(-t + a)/\tau)} \quad (2)$$

В (2) константы имеют следующие значения: $\tau = 10^{-9}$, $a = 10^8$. Функция (2) является функцией Ферми, смещенной по оси x . Выбор функции Ферми обусловлен необходимостью использовать непрерывно-дифференцируемую функцию. В некоторых случаях функцию Ферми используют как определение функции Хэвисайда, устремляя $\tau \rightarrow 0$ [7]. При заданных значениях τ и a $u(0) = 1,67 \times 10^{-5}$, что допустимо и существенного влияния на результаты расчета не оказывает. В пространстве создается плоская электромагнитная волна с амплитудой электрического поля 1 В/м, как демонстрирует рис. 10:

$$E_{\max}/H_{\max} = 1/0,00265 \approx 377 \text{ Ом.}$$

Погрешность расчетов не превышает 1 %, что допустимо, и вызвана не достаточно мелкой сеткой конечных элементов в расчетной области.

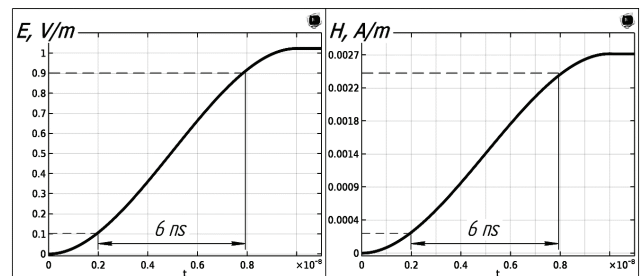


Рисунок 10 – Плоская волна в моделируемой области

В зависимости от геометрических размеров неровности, будут в той или иной степени проявляться эффекты отражения или искажения фронта волны. В случае испытательного полигона неровности заземленной плоскости изменяют межэлектродный зазор, что приводит к увеличению либо ослаблению поля, а

эффекты искажения формы волны проявляются незначительно. Геометрическая длина фронта волны α между уровнями $0,1 \cdot E_{\max}$ и $0,9 \cdot E_{\max}$ (6 нс) составляет 1,8 м. Высота профиля неровности указывается относительно высоты расчетной области. Для высоты неровности $0,1 \times h$ и длины неровности менее α , искажение поля в рабочей зоне не более ± 3 dB. Процесс распространения плоской электромагнитной волны вдоль поверхностей представлен на рис. 11.

Рис. 11 представляет собой график с обозначением уровней $0,1 \cdot E_{\max}$, $0,5 \cdot E_{\max}$, $0,9 \cdot E_{\max}$, E_{\max} , $1,4 \cdot E_{\max}$ в цветовой шкале.

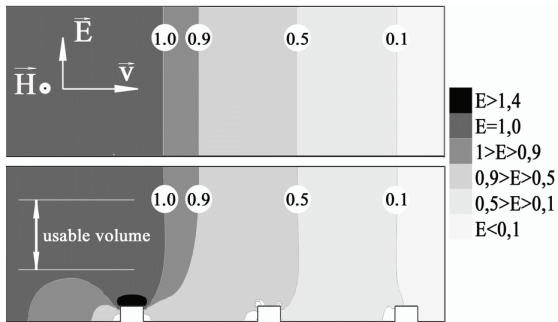


Рисунок 11 – Распределение плоской электромагнитной волны вдоль гладкой поверхности и вдоль поверхности с периодически неоднородной структурой (высота неоднородности $0,1h$)

Выводы. Проведен расчет электрического поля в рабочей зоне полеобразующей системы с отношением ширины и длины электродов равным 1. Неоднородность поля в рабочей зоне составила не более $+1/-2$ dB. При соотношении h/B более 2, неоднородность поля составляет более -3 dB. Показан характер влияния неровностей заземленной поверхности на распространение плоской электромагнитной волны. Для высоты неровности $0,1$ от высоты полеобразующей системы и длины неровности менее длины волны, искажение поля в рабочей зоне не более ± 3 dB.

Список литературы:

1. NATO AECTP-500:2016 Electromagnetic Environmental Effects. Test and Verification, Edition E. – Version 1. – December 2016. – 1125 p.
2. Гуревич В.И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса / В.И. Гуревич. – М.: Инфра-

Инженерия, 2016. – 302 с.

3. MIL-STD-461G:2011 Department of defense interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.

4. Crawford L. Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells / L. Crawford // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – November 1974. – Vol. EMC-16, No. 4.

5. Аникин В. В. Перспективы использования GTEM-камер для автоматизированных испытаний технических средств на электромагнитную совместимость / В. В. Аникин, И. Е. Бакулин, С. В. Герасимов // Системы обработки информации. – 2010. – № 6. – С. 46-48.

6. Гирка Ю.Н. Метрологическая аттестация межэлектродного расстояния в полосковых линиях эталона РЭМП / Ю.Н. Гирка // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 21. – С. 40-43.

7. Земсков В.А. Основы теории сигналов и систем. Часть 1 / В.А. Земсков. – Саратов: СВВКИУ, 2004. – 132 с.

References (transliterated)

1. NATO AECTP-500:2016 Electromagnetic Environmental Effects. Test and Verification, Edition E. Version 1. December 2016. 1125 p.
2. Gurevich V.I. Zashhita oborudovaniya podstancij ot jelektromagnitnogo impul'sa. [Protection of substation equipment against electromagnetic impulse]. Moscow, Ingeniering, 2016. 302 p.
3. MIL-STD-461G Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, 2007
4. Crawford L. Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. November 1974. Vol. EMC-16, No. 4.
5. Anikin V.V. Perspektivy ispol'zovanija GTEM-kamer dlja avtomatizirovannyh ispytaniy tehniceskikh sredstv na jelektromagnitnuju sovmestimost' [Prospects of the use of gtem-kamer for the automated tests of hardwares on electromagnetic compatibility]. Information processing systems. Available at: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/7812/eng>
6. Girka Ju. N. Metrologicheskaja attestacija mezhelektrodnogo rasstojanija v poloskovykh linijah jetalona RJEMP [Definition of interelectrode distance is presented in the strip lines of Etalon PEMF] Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Available at: <http://vestnik.kpi.kharkov.ua>.
7. Zemskov V. A. Osnovy teorii signalov i sistem. Chast' 1. [Fundamentals of the theory of signals and systems. Part 1] Saratov: SVVKIU, 2004. 132 p.

Поступила (received) 17.03.2017.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Особливості формування імпульсного електромагнітного поля в полосковій лінії / С. П. Шаламов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 98-102. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

Особенности формирования импульсного электромагнитного поля в полосковой линии / С. П. Шаламов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 98-102. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

Formation of the impulse electromagnetic field in the strip line / S. P. Shalamov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 98-102.. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шаламов Станіслав Павлович – молодший науковий співробітник; аспірант НТУ «ХПІ»; тел.: 066-62-60-187; e-mail: shalamov.stas@mail.ru.

Шаламов Станіслав Павлович – младший научный сотрудник; аспирант НТУ «ХПІ»; тел.: 066-62-60-187; e-mail: shalamov.stas@mail.ru.

Shalamov Stas Pavlovich – Research Assistant; Postgraduate Student NTU «KPI»; tel.: 066-62-60-187; e-mail: shalamov.stas@mail.ru.

УДК 621.314

О.В. ШУТЕНКО**АНАЛИЗ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ НАРАСТАНИЯ ГАЗОВ
В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ**

У статті досліджено закони розподілу швидкостей наростання газів в нормально працюючих силових, високовольтних трансформаторах негерметичного виконання. Встановлено, що при відсутності дефекту в негерметичних високовольтних трансформаторах значення швидкостей наростання газів можуть приймати як позитивні (новоутворення газів), так і негативні (дифузія газів з масла) значення, при цьому значення швидкостей наростання для одного і того ж газу в одному і тому ж трансформаторі, отримані в різні моменти часу можуть відрізнитися на кілька порядків і при цьому можуть перевищувати граничні значення. Виконаний аналіз показав, що в негерметичних трансформаторах, при відсутності дефекту значення швидкостей наростання газів можуть бути описані розподілом Лапласа. Даний закон дозволяє враховувати як утворення газів, так і їх дифузію в атмосферу.

Ключові слова: аналіз розчинених у маслі газів, виділення газів, швидкості наростання газів, дифузія газів, статистична обробка даних, розподіл Лапласа, критерії згоди.

В статье исследованы законы распределения скоростей нарастания газов в нормально работающих силовых, высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения. Установлено, что при отсутствии дефекта в негерметичных высоковольтных трансформаторах значения скоростей нарастания газов могут принимать как положительные (новообразование газов), так и отрицательные (диффузия газов из масла) значения, при этом значения скоростей нарастания для одного и того же газа в одном и том же трансформаторе, полученные в разные моменты времени могут отличаться на несколько порядков и при этом могут превышать граничные значения. Выполненный анализ показал, что в негерметичных трансформаторах, при отсутствии дефекта значения скоростей нарастания газов могут быть описаны распределением Лапласа. Данный закон позволяет учитывать как образование газов, так и их диффузию в атмосферу.

Ключевые слова: анализ растворенных в масле газов, выделение газов, скорости нарастания газов, диффузия газов, статистическая обработка данных, распределение Лапласа, критерии согласия.

The article deals with the laws of distribution of the rates of gas growth in normally operating power, high-voltage transformers of a leaky design. It is established that in the absence of a defect in unsealed high-voltage transformers, the values of the rates of gas growth can take both positive (new formation of gases) and negative (diffusion of gases from the oil) values, while the values of the rates of increase for the same gas in the same gas Transformer, obtained at different times can differ by several orders of magnitude and can exceed the boundary values. To reduce the heterogeneity of measurement results, an algorithm for statistical processing of the results of analysis of gases dissolved in oil is proposed. The performed analysis showed that in non-hermetically sealed transformers, in the absence of a defect, the values of the rates of increase of gases can be described by the Laplace distribution, as evidenced by the values of the agreement criteria given in the text of the article. This law makes it possible to take into account both the formation of gases and their diffusion into the atmosphere. The physical substantiation of the use of the Laplace criterion for analyzing the values of the rates of increase of gases is given.

Keywords: analysis of gases dissolved in oil, gas evolution, rate of gas build-up, gas diffusion, statistical data processing, Laplace distribution, compliance criteria.

Постановка проблеми. Одним из критериев, позволяющих оценить степень развития дефекта в силовых трансформаторах [1-2], является скорость нарастания газов. В большинстве методик по интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов [3-7] регламентированы допустимые значения скоростей нарастания газов, которые имеют статус либо граничных, либо типичных значений. Помимо различий в формулах, рекомендуемых для расчета скоростей нарастания разными методиками и как следствие их разных значений, имеет место различия и в подходе к заданию допустимых значений скоростей нарастания. Так в методике МЭК [3] типичные значения скоростей нарастания отличны для водорода, ацетилен, оксида и диоксида углерода, а для метана, этана и этилена совпадают. В методике IEEE Std C57.104 [4] типичные значения скоростей нарастания газов задаются в виде диапазона значений, которые связаны с суммой концентраций горючих газов и периодичностью наблюдений. В Украине [6] нормируется значение скорости нарастания

суммы газов углеводородного ряда, которое составляет 30 мкл/сут. В Российской Федерации [7] в качестве допустимого значения скорости нарастания для всех газов рекомендовано значение относительной скорости нарастания равное 10% в месяц. Приведенные примеры свидетельствуют об отсутствии единого подхода к определению граничных значений скоростей нарастания газов. Кроме того, регламентируемые разными методиками допустимые значения скоростей нарастания газов не учитывают влияние целого ряда факторов, что может привести к принятию ошибочных решений при диагностике трансформаторов. Одним из возможных подходов к корректировке допустимых значений скоростей нарастания газов, является использование методов математической статистики, в частности анализа распределений диагностических критериев в оборудовании с разным состоянием.

Анализ публикаций. В работе [8] выполнена корректировка граничных значений скоростей нарастания газов для маслonaполненных вводов и измери-

тельных трансформаторов. Допустимые и предельно допустимые значения скоростей нарастания газов для вводов определялись с учетом таких факторов, как: тип исполнения ввода, сорт масла, класс напряжения, срок эксплуатации. Для трансформаторов напряжения значения скоростей нарастания получены с учетом срока эксплуатации и сорта масел. Для трансформаторов тока учитывались класс напряжения, сорт масла и вид защиты. Предельно допустимые значения относительных скоростей нарастания концентраций газов в силовых трансформаторах со свободным дыханием и пленочной защитой приведены в работе [9]. Эти значения получены с учетом региона, в котором эксплуатируются трансформаторы, и срока службы. Предельно допустимые и допустимые значения скоростей нарастания газов для разных типов оборудования, которые приведены в работах [8, 9], получены на основе анализа интегральных функций распределения скоростей нарастания газов в нормально работающем оборудовании. В тоже время результаты исследований законов распределения скоростей нарастания газов освещены недостаточно, что и послужило поводом для проведения данных исследований.

Цель статьи. В статье приведены результаты исследований законов распределений скоростей нарастания газов в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения.

Статистическая обработка результатов эксплуатационных испытаний. Для исследования законов распределения скоростей нарастания газов использовались результаты хроматографического анализа по Донецкой, Луганской, Полтавской, Сумской, Харьковской областям, Украины. Всего проанализированы результаты наблюдений по 426 трансформаторам, негерметичного исполнения, напряжением 110 и 330 кВ общим объемом 54658 значений.

Значения скоростей нарастания газов рассчитывались как [6]:

$$R_i = \frac{(S_2 - S_1) \cdot V}{t} \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где R_i – скорость нарастания газов, мл/сутки; S_1 – концентрация газа или сумма концентраций газов углеводородного ряда первой пробы, мкл/л; S_2 – концентрация газа или сумма концентраций газов углеводородного ряда второй пробы, мкл/л; V – объем масла в баке трансформатора, л; t – время между отбором проб, сутки.

Как показал анализ, значение скоростей нарастания, полученные в результате расчета, могут принимать как положительные (новообразование газов), так и отрицательные (диффузия газов из масла) значения. При этом сами значения скоростей нарастания существенно разнятся. Значительный разброс полученных значений скоростей нарастания обусловлен как большим количеством измерений, для которых концентрации газов не превышают значений аналитического порога распознавания, так и разными условиями эксплуатации трансформаторов, отличиями в конструк-

тивном исполнении, разными сортами масел и т.д.

Известно [8], что чувствительность обнаружения концентраций газов хроматографом находится на уровне 10^{-4} - 10^{-5} % объема. Как правило, в картах хроматографического анализа значения ниже предела обнаружения обозначаются как «0» либо «отсутствует». Как отмечается в [6], суммарная погрешность анализа, при значениях концентраций газов углеводородного ряда 10 мкл/л (0,001% объема) может достигать 50%. Систематическая погрешность измерения концентраций газов, растворенных в масле, может достигать 19,7% [8] и растет по мере приближения концентраций к порогу чувствительности хроматографа. Таким образом, наличие большого числа концентраций ниже и близких к порогу чувствительности хроматографа является источником погрешности результатов ХАРГ, что в свою очередь приводит к статистической неоднородности результатов и к искажению законов распределений. Для снижения погрешности, анализ значений скоростей нарастания газов выполнялся только в том случае, если значения концентраций газов превышали аналитический порог распознавания, регламентированный в [6].

При анализе результатов расчета выяснилось, что значения скоростей нарастания для одного и того же газа в одном трансформаторе, полученные в разные моменты времени могут отличаться на несколько порядков. Это обусловлено, как изменениями загрузки трансформаторов, так и аварийными воздействиями со стороны электрической сети (короткие замыкания, перенапряжения и т.д.). Для выделения аномально высоких и низких значений скоростей нарастания был использован подход, основанный на выделении грубых промахов из числа однотипных измерений. Учитывая, что вид закона распределения неизвестен и, судя по литературной информации, отличен от нормального, то для выделения грубых промахов был использован статистический критерий Ирвина. Для этого из значений скоростей нарастания газов, по каждому трансформатору строился вариационный ряд, и оценивались сомнительные значения на обоих краях ряда. Для чего вычислялось расчетное значение критерия Ирвина:

$$\eta_{\text{расч.}} = \frac{(x_k - x_{k \text{ пред}})}{S}, \quad (2)$$

где x_k – подозрительное значение; $x_{k \text{ пред}}$ – предыдущее значение в вариационном ряду.

Полученное расчетное значение критерия Ирвина сравнивалось с критическим значением $\eta_{\text{табл}}$ [10, 11]. Если $\eta_{\text{расч.}} > \eta_{\text{табл.}}$, то рассматриваемое значение отбрасывалось и проверялось следующее. Проверка продолжалась, пока не выполнялось условие $\eta_{\text{расч.}} < \eta_{\text{табл.}}$. Результаты тестирования иллюстрирует рисунок 1, на котором приведена зависимость скорости нарастания этилена в масле от продолжительности эксплуатации для трансформатора ПС «Стандарт» Т-1 ТДНГ-6,3/110/10, Луганскоблэнерго, для исходных данных (рис. 1. а) и после обработки (рис. 1. б).

Как видно из рисунка использование критерия Ирвина позволяет существенно снизить неоднород-

ность результатов испытаний.

Формирование массивов с однородными значениями скоростей нарастания газов выполнялось с использованием трех статистических критериев [10, 11]:

1) Ранговый непараметрический критерий Уилкоксона (W) – для проверки статистической гипотезы о схожести законов распределения двух независимых выборок;

2) Z критерий (Z) – для проверки статистической гипотезы о равенстве математических ожиданий двух независимых выборок;

3) Критерий Фишера-Снедекора (F) – для проверки статистической гипотезы о равенстве дисперсий двух независимых выборок.

Две независимые выборки считались однородными, если по результатам тестирования статистические гипотезы:

– о схожести законов распределения двух независимых выборок;

– о равенстве математических ожиданий двух независимых выборок;

– о равенстве дисперсий двух независимых выборок не отвергались при заданном уровне значимости $\alpha = 0.05$.

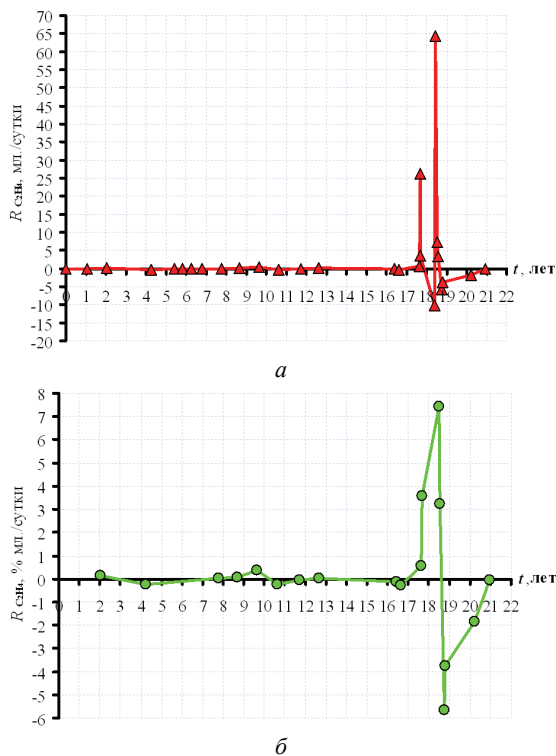


Рисунок 1 – Зависимость скорости нарастания этилена в масле от продолжительности эксплуатации для трансформатора ПС «Стандарт» Т-1 ТДНГ-6,3/110/10, Луганскоблэнерго

Далее формирование массивов с однородными значениями скоростей нарастания газов выполнялось с использованием трех, описанных выше, статистических критериев, но при этом результаты хроматографического анализа по двум трансформаторам объединялись в один массив не только при выполнении трех условий однородности, но и при одинаковом объеме

выборочных значений.

Результаты тестирования иллюстрирует рис. 2, на котором приведены зависимости содержания в масле этилена от продолжительности эксплуатации, для исходного массива данных и одного из массивов, полученного в результате обработки. Сравнивая зависимости на рис. 2, а и 2, б легко увидеть, что в результате статистической обработки неоднородность анализируемых данных значительно снижается.

Оценка законов распределения скоростей нарастания газов. В результате выполненного статистического анализа для каждого из газов были сформированы несколько массивов с однородными значениями скоростей нарастания, что свидетельствует о необходимости нормировки граничных значений скоростей нарастания газов для различных групп трансформаторов с учетом наиболее влияющих факторов. При этом анализ массивов данных с однородными значениями скоростей нарастания газов показал, что схожие значения скоростей нарастания могут иметь место в трансформаторах разного номинального напряжения (330 и 110 кВ), разной номинальной мощности и разного типоразмера. Эти результаты отличаются от опубликованных в работах [8, 9].

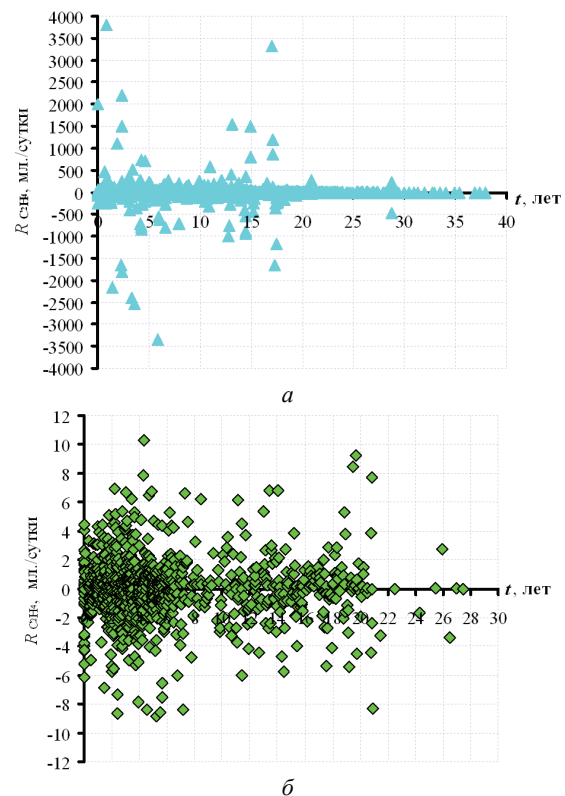


Рисунок 2 – Однородный массив данных скоростей нарастания этилена в масле бездефектных трансформаторов негерметичного исполнения: а – массив исходных данных до обработки; б – массив с однородными значениями скоростей нарастания газов, полученный после статистической обработки

По мнению автора, основной причиной выявленных отличий являются разные режимы работы трансформаторов. Вероятней всего влияние особенностей

конструктивного исполнения трансформаторов можно выявить при схожих условиях их эксплуатации, в частности при близком составе потребителей, близких значениях коэффициентов загрузки, одинаковых климатических условиях и т.д. В тоже время выявлены достаточно существенные различия между значениями скоростей нарастания газов в трансформаторах, залитых разными сортами масел (ГК, Т-750, НИТРО), что совпадает с результатами опубликованных ранее исследований

В табл. 1 приведены характеристики однородных массивов с минимальными и максимальными значениями скоростей нарастания газов, по каждому из газов. В таблице приведены: объем выборочных значений N , значения выборочного среднего M_x , дисперсии D_x , а также коэффициентов асимметрии и эксцесса j_a и j_e для данных из однородных массивов с минимальными (M_1) и максимальными (M_2) значениями скоростей нарастания.

Как видно из таблицы, значения выборочных средних для скоростей нарастания одних и тех же газов в разных массивах значимо отличаются, что свидетельствует о различных условиях, в которых эксплуатировались исследуемые трансформаторы. Судя по значениям коэффициента асимметрии, анализируемые распределения являются симметричными относительно математического ожидания. Все без исключения массивы данных имеют положительное значение коэффициента эксцесса, что говорит о том, что кривая распределения имеет более высокую и «острую» вершину, чем кривая нормального закона.

Таблица 1 – Статистические характеристики однородных массивов скоростей нарастания растворенных в масле газов

Газ	Массив	N	M_x	D_x	j_a	j_e
CH ₄	M_1	169	0,107	0,412	0,332	4,316
	M_2	1192	0,431	41,270	0,173	5,603
C ₂ H ₄	M_1	214	-0,001	0,228	0,272	4,357
	M_2	187	3,020	167,635	0,224	5,984
C ₂ H ₆	M_1	141	0,017	0,069	0,568	4,778
	M_2	773	0,572	12,607	0,057	5,921
C ₂ H ₂	M_1	416	0,028	0,281	0,101	3,627
	M_2	103	-0,162	7,849	0,009	5,452
C _x H _y	M_1	108	0,083	0,330	0,542	4,116
	M_2	566	1,009	69,986	0,137	5,929
H ₂	M_1	148	0,112	0,840	-0,280	4,941
	M_2	179	0,227	43,089	-0,023	3,683
CO	M_1	245	0,346	23,197	-0,112	5,725
	M_2	441	12,268	3242,21	-0,152	3,658
CO ₂	M_1	260	-0,932	380,163	-0,204	4,722
	M_2	1649	21,121	26805,1	0,253	6,527
N ₂	M_1	51	-0,028	0,048	0,128	4,109
	M_2	277	0,546	6,638	0,526	7,738
O ₂	M_1	87	0,008	0,079	0,213	5,717
	M_2	86	0,077	1,425	-0,025	4,621

Построение гистограмм эмпирического распределения, оценка параметров 18 известных законов распределения, расчет значений критериев согласия (χ^2 Пирсона и критерия Колмогорова-Смирнова) выполнялись с помощью разработанной на кафедре «Передача электрической энергии» НТУ «ХПИ» программы «ZR» [10], результаты работы которой иллюстрирует рис. 3.

Таблица 2 – Значения параметров закона распределения Лапласа, а также расчетные и критические значения (при $\alpha = 0,05$) критериев Пирсона и Колмогорова-Смирнова для однородных массивов скоростей нарастания газов растворенных в масле бездефектных трансформаторов

Газ	Массив	Параметры закона распределения		Значение критерия Пирсона			Значение критерия Колмогорова-Смирнова	
		α	β	f	$\chi^2_{расч.}$	$\chi^2_{крит.}$	$\lambda_{расч.}$	$\lambda_{крит.}$
CH ₄	M_1	0,10713	0,45544	3	5,533	7,820	0,636	1,360
	M_2	0,43120	4,54446	6	11,32	12,600	0,533	1,360
C ₂ H ₄	M_1	-0,0014	0,33858	4	8,521	9,490	0,734	1,360
	M_2	3,01994	9,17977	3	5,147	7,820	0,956	1,360
C ₂ H ₆	M_1	0,01732	0,18679	3	6,007	7,820	0,963	1,360
	M_2	0,57227	2,51230	6	2,364	12,600	0,335	1,360
C ₂ H ₂	M_1	0,02846	0,37552	6	9,284	12,600	0,750	1,360
	M_2	-0,1620	1,99077	2	3,493	5,990	0,723	1,360
C _x H _y	M_1	0,08319	0,40837	4	8,839	9,490	0,724	1,360
	M_2	1,00897	5,92073	5	2,861	11,100	0,405	1,360
H ₂	M_1	0,11237	0,65037	3	6,473	7,820	0,942	1,360
	M_2	0,22739	4,65461	4	3,485	9,490	0,498	1,360
CO	M_1	0,34555	3,41264	3	0,101	7,820	0,119	1,360
	M_2	12,2680	40,30869	9	15,10	16,900	0,401	1,360
CO ₂	M_1	-0,9319	13,81359	3	1,067	7,820	0,402	1,360
	M_2	21,1211	115,8044	6	7,420	12,600	0,483	1,360
N ₂	M_1	-0,0275	0,15678	1	0,732	3,840	0,165	1,360
	M_2	0,54565	1,82508	2	4,527	5,990	0,524	1,360
O ₂	M_1	0,00803	0,19949	2	2,691	5,990	0,553	1,360
	M_2	0,07707	0,84890	2	1,261	5,990	0,410	1,360

По результатам анализа выполненного с помощью программы «ZR» удалось установить, что распределение скоростей нарастания газов для бездефектных трансформаторах негерметичного исполне-

ния, не имеющих дефектов, подчиняется закону распределения Лапласа с плотностью:

$$p(x; \alpha; \beta) = \frac{\alpha}{2} \cdot e^{-\alpha|x-\beta|}, \quad (3)$$

где α, β – параметры закона распределения, интерпретируемые соответственно как параметр масштаба и параметр формы.

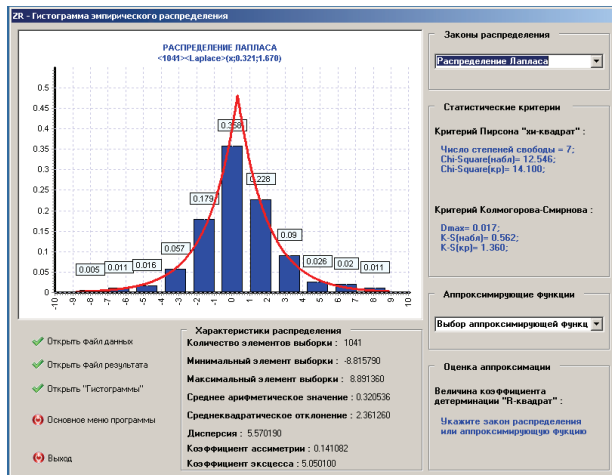


Рисунок 3 – Диалоговое окно программы «ZR» при исследовании законов распределения скоростей нарастания газов

Значения параметров масштаба и формы для закона распределения Лапласа определялись по выражениям:

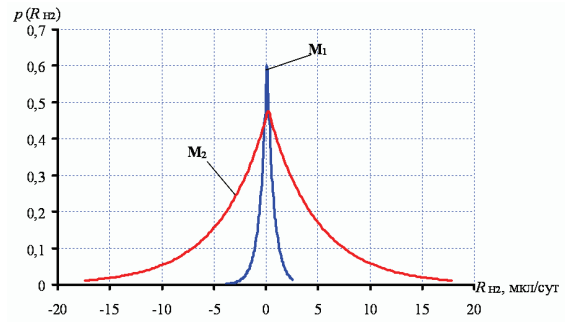
$$\alpha = \sqrt{\frac{D}{2}}; \beta = M, \quad (4)$$

где M – значение выборочного среднего; D – значение выборочной дисперсии.

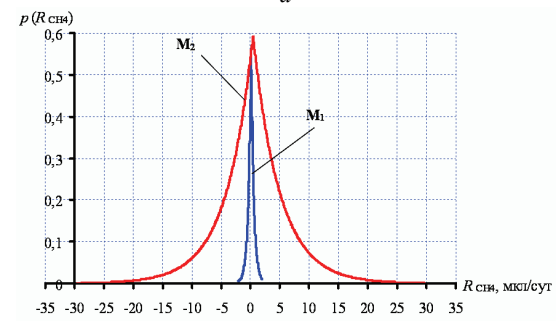
Значения параметров распределения α и β , критериев согласия χ^2 и критерия Колмогорова-Смирнова приведены в табл. 2.

Как видно из таблицы для всех массивов данных расчетные значения критерия согласия Пирсона и критерия Колмогорова-Смирнова не превышают критических точек, на основании чего можно сделать вывод о том, что нет оснований для того, чтобы отвергнуть гипотезу о приемлемости закона распределения Лапласа.

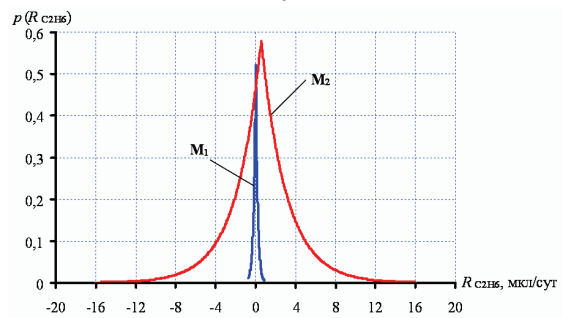
Анализ полученных результатов. На рис. 4 приведены функции плотности теоретических распределений Лапласа для минимальных и максимальных значений скоростей нарастания газов в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения. Как видно из рисунка, значения скоростей нарастания значительно различаются для разных газов, а следовательно, предельные значения скоростей нарастания для разных газов должны отличаться. Различия в значениях скоростей нарастания для разных газов обусловлено разным уровнем энергии, необходимой для образования газов в результате воссоединения моноуглеродных радикалов и молекулярного водорода, которые в свою очередь образуются из-за распада углеводородов. Кроме того значения коэффициентов растворимости газов в масле, которые и определяют процесс их диффузии в атмосферу, также разнятся для различных газов (наименьшие значения коэффициентов растворимости наблюдаются для водорода, оксида углерода и метана, наибольшие – для этана, этилена и ацетилена).



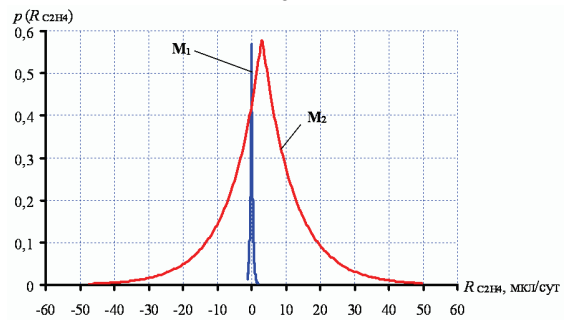
а



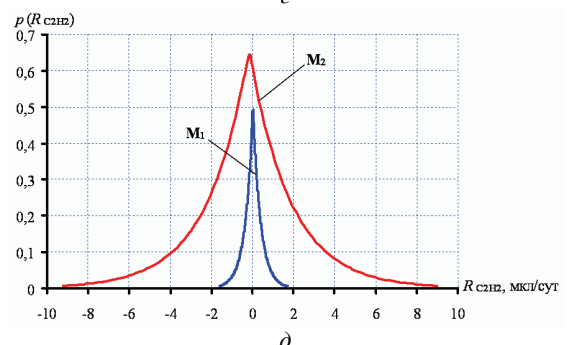
б



в

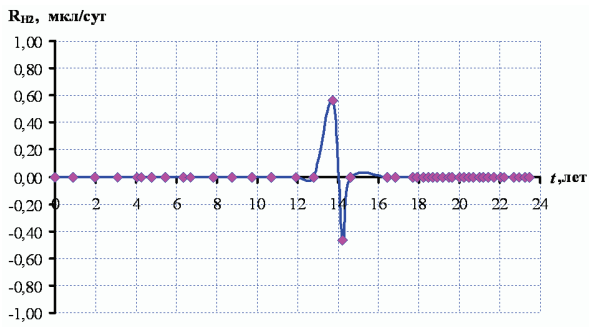


г

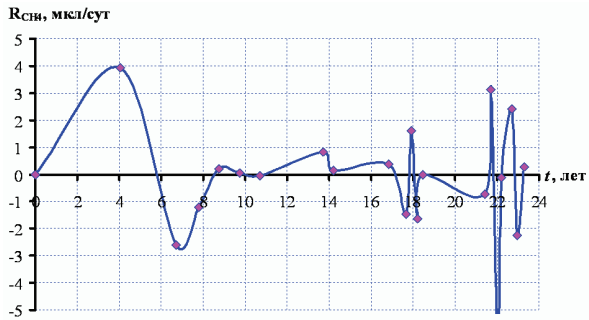


д

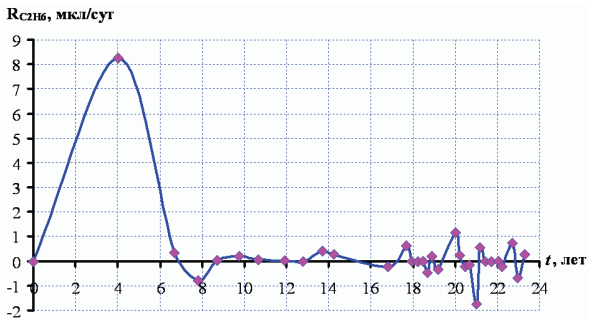
Рисунок 4 – Функции плотности теоретических распределений Лапласа для минимальных и максимальных значений скоростей нарастания газов в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения: а – водород; б – метан; в – этан; г – этилен; д – ацетилен



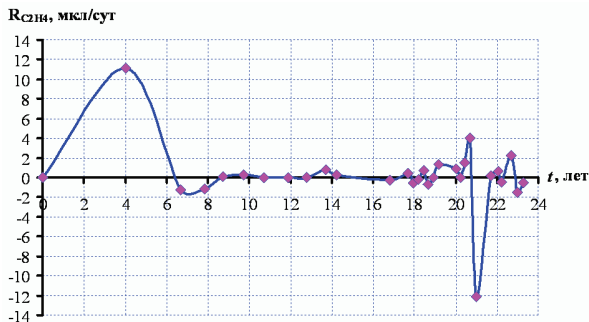
a



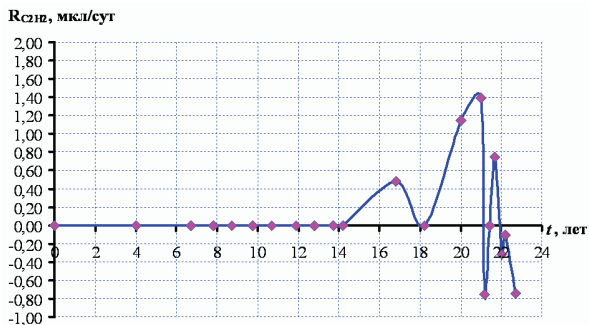
б



в

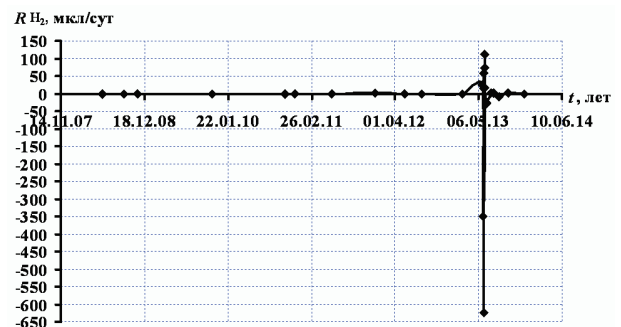


г

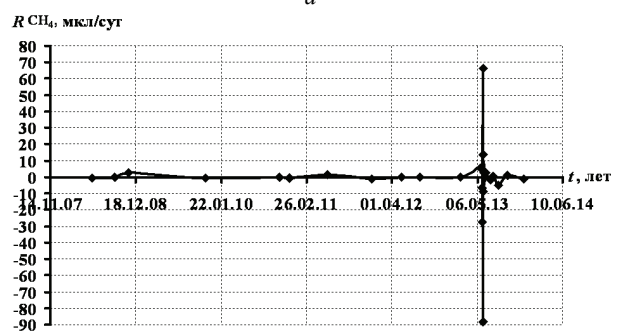


д

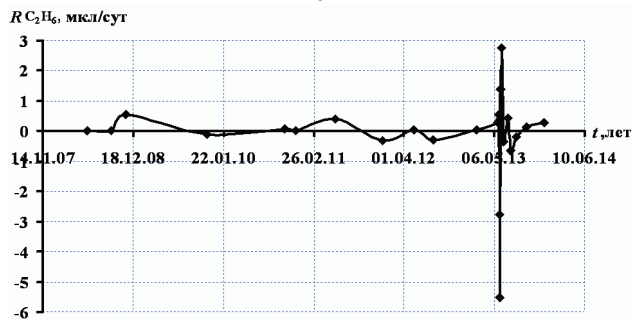
Рисунок 5 – Динамика изменения скоростей нарастания газов в бездефектном трансформаторе:
а – водород; б – метан; в – этан; г – этилен д – ацетилен



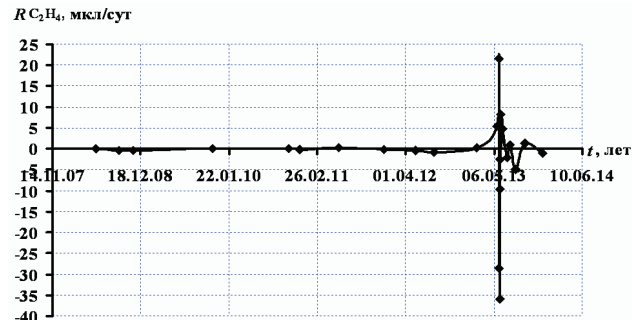
a



б



в



г



д

Рисунок 6 – Динамика изменения скоростей нарастания газов в бездефектном трансформаторе, подвергнутому воздействию тока к.з.:
а – водород; б – метан; в – этан; г – этилен д – ацетилен

Также, на значения концентраций газов в негерметичном оборудовании, а следовательно, и на скорости их нарастания оказывает влияние процесс окисления масла атмосферным кислородом. Симметричность распределений скоростей нарастания газов относительно математических ожиданий должно свидетельствовать о том, что при отсутствии дефекта имеет место некоторое равновесие между количеством образовавшегося газа и количеством газа ушедшего в атмосферу.

Если проанализировать динамику изменения скоростей нарастания во времени для нормально работающего бездефектного трансформатора (рис. 5), то можно увидеть, что практически за каждым положительным значением скоростей нарастания газов следует отрицательное значение. Особенно данная тенденция проявляется при воздействиях на трансформаторы аварийных режимов со стороны электрической сети. На рисунке рис. 6 отображена динамика изменения скоростей нарастания газов в трансформаторе ТДТН-31,5/110/35/6 до и после воздействия однофазного короткого замыкания. Как видно из рисунка после резкого возрастания значений концентраций газов, вызванного воздействием токов к.з., имеет место их не менее резкое снижение, после чего скорости нарастания возвращаются к значениям, характерным для нормального режима работы, что и обуславливает симметричность закона распределения.

«Остроконечность» распределения обусловлена тем, что с увеличением, по сравнению с математическим ожиданием, как положительных, так и отрицательных значений скоростей нарастания газов, вероятность их появления снижается по закону, близкому к экспоненциальному.

Выводы

1. В бездефектных высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения значения скоростей нарастания газов могут принимать как положительные (новообразование газов), так и отрицательные (диффузия газов из масла) значения.

2. Значения скоростей нарастания для одного и того же газа в одном и том же трансформаторе, полученные в разные моменты времени могут отличаться на несколько порядков и при этом могут превышать граничные значения. Это обусловлено как изменениями загрузки трансформаторов, так аварийными воздействиями со стороны электрической сети (короткие замыкания, перенапряжения и т.д.).

3. В результате выполненного статистического анализа для каждого из газов были сформированы несколько массивов с однородными значениями скоростей нарастания, что свидетельствует о необходимости нормировки граничных значений скоростей нарастания газов для различных групп трансформаторов, с учетом наиболее влияющих факторов.

4. Выполнен анализ, законов распределения скоростей нарастания девяти газов растворенных в масле трансформаторов, не имеющих дефекты. Установлено, что при отсутствии дефекта значения скоростей нарастания подчиняются закону распределения Лап-

ласа.

5. В бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения значения скоростей нарастания значимо различаются для разных газов, а, следовательно, предельные значения скоростей нарастания для разных газов должны отличаться.

Список литературы:

1. Алексеев Б.А. Оценка состояния силовых трансформаторов. Интерпретация результатов газохроматографического анализа масел / Б. А. Алексеев // Электро. – 2002. – № 2. – С. 10-15.

2. Шутенко О.В. Анализ проблем, возникающих при интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов / О.В. Шутенко, В.Б. Абрамов, Д.Н. Баклай // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2013. – № 59 (1032). – С. 164-180.

3. IEC Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis. IEC Standard 60599, IEC publ. 60599, Mar. 1999.

4. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil -Immersed Transformers, IEEE Standard C57.104 – 2008.

5. Gray I. A. R. A Guide Transformer Oil Analysis, Transformer Chemistry Services. <[http://www.satcs.co.za/Transformer Oil Analysis.pdf](http://www.satcs.co.za/Transformer%20Oil%20Analysis.pdf)> (2/2013).

6. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006: Діагностика маселонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. – К.: 2007.

7. РД 153-34.0-46.302-00: Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. – Офиц. изд. М.: НЦ ЭНАС, 2001.

8. Давиденко И.В. Критерии оценки технического состояния маселонаполненных вводов и измерительных трансформаторов по скорости роста концентраций растворенных газов / И.В. Давиденко // Сб. докладов научно-практической конференции специалистов Сибири и Востока «Диагностика электрических установок». Новосибирск: ЦПРО, 2009. – С. 57-68.

9. Давиденко И.В. Развитие критерия скорости нарастания газов в масле при диагностике силовых трансформаторов / И.В. Давиденко // Сб. докладов II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Энергосистема: управление, качество, конкуренция». – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – № 12 (42). – С. 266-270.

10. Шутенко О.В. Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных : Учеб. пособие для вузов / О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – 268 с.

11. Шутенко О.В. Особенности статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний при исследовании законов распределения результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов / О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 136-150.

References (transliterated):

1. Alekseev B.A. Ocenka sostojanija silovyh transformatorov. Interpretacija rezul'tatov gazohromatograficheskogo analiza masel [Assessment of the state of power transformers. Interpretation of the results of gas chromatographic analysis of oils]. Jelektro, Moscow, 2002, no 2, pp. 10-15.

2. Shutenko O.V., Abramov V.B., Baklaj D.N. Analiz

problem, vznikajushih pri interpretacii rezultatov hromatograficheskogo analiza rastvorenyh v masle gazov [An analysis of the problems encountered in interpreting the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. Vestn. Khar'k. politekhn. in-ta. Ser.: Energetika: nadijnist' ta energoefektivnist' [Bulletin of the Kharkiv Polytechnic Institute. Series: Energy reliability and energy efficiency]. Kharkiv, 2013, no 59, issue 1032, pp 164-180.

3. IEC Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis. IEC Standard 60599, IEC publ. 60599, Mar. 1999.

4. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil -Immersed Transformers, IEEE Standard C57.104 – 2008.

5. Gray I. A. R. A Guide Transformer Oil Analysis, Transformer Chemistry Services. <http://www.satcs.co.za/ Transformer Oil Analysis.pdf> (2/2013).

6. SOU-N EE 46.501: Diagnostika maslonapovnenogo transformatornogo obladnannja za rezultatami hromatografichnogo analizu vil'nih gaziv, vidibranih iz gazovogo rele, i gaziv, rozchinenih u zoljacijnomu masli [SOU-N EE 46.501: Diagnosis oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gas with gas relay selected, i gases dissolved in insulating oil]. Kyiv: 2007, 92 p.

7. RD 153-34.0-46.302-00: Metodicheskie ukazaniya po diagnostike razvivajushih defektov transformatornogo oborudovaniya po rezultatami hromatograficheskogo analiza gazov, rastvorenyh v masle. [RD 153-34.0-46.302-00: Guidelines for the diagnosis of developing defects in transformer equipment based on the results of the chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. Moskow: NC JeNAS, 2001, 28 p.

8. Davidenko I.V. Kriterii ocenki tehničeskogo sosto-

janija maslonapolnennyh vvodov i izmeritel'nyh transformatorov po skorosti rosta koncentracij rastvorenyh gazov. [Criteria for assessing the technical condition of oil-filled bushings and measuring transformers in terms of the growth rate of concentrations of dissolved gases] Sb. dokladov nauchno-praktičeskoj konferencii specialistov Sibiri i Vostoka "Diagnostika jelektričeskikh ustanovok". Novosibirsk: GCRO, 2009, pp. 57-68.

9. Davidenko I.V. Razvitie kriterija skorosti narastaniya gazov v masle pri diagnostike silovyh transformatorov [Development of the criterion of the rate of increase of gases in oil in the diagnostics of power transformers]. Sb. dokladov II Vserosijskoj nauchno-tehničeskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Jenergosistema: upravlenie, kachestvo, konkurencija". Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI. 2004. No 12 (42). pp. 266-270.

10. Shutenko O.V., Baklaj D.N. Planirovanie jeksperimental'nyh issledovanij v jelektroenergetike. Metody obrabotki jeksperimental'nyh dannyh [Planning of experimental research in the electric power industry. Methods for processing experimental data]. Kharkiv: NTU "KhPI", 2013, 268 p.

11. Shutenko O.V., Baklaj D.N. Osobennosti statističeskoj obrabotki rezultatov jekspluatacionnyh ispytanij pri issledovanii zakonov raspredelenija rezultatov hromatograficheskogo analiza rastvorenyh v masle gazov. [Features of statistical processing of the results of operational tests in the study of the laws of distribution of the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil.] Vestn. Khar'k. politekhn. in-ta. Ser.: Energetika: nadijnist' ta energoefektivnist' [Bulletin of the Kharkiv Polytechnic Institute. Series: Energy reliability and energy efficiency]. Kharkiv, 2013, No 60 (1033), pp. 136-150.

Поступила (received) 10.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз законів розподілу швидкостей наростання газів у високовольтних трансформаторах негерметичного виконання / О. В. Шутенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 103-110. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Анализ законов распределения скоростей нарастания газов в высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения / О. В. Шутенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 103-110. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

The analysis of laws of speeds distribution of gases increase in high-voltage transformers of not tight manufacturing / O.V. Shutenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 103-110. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шутенко Олег Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Передача електричної енергії», НТУ «ХПІ», тел.: (057)707-66-43; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com.

Шутенко Олег Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Передача электрической энергии», НТУ «ХПІ», тел.: (057)707-66-43; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com.

Shutenko Oleg Volodimirovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor at the Department of «Electric power transmission», NTU «KhPI», tel.: (057)707-66-43; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com.

УДК 534.231/534-16 : 621.373

O. PETRISCHEV, V. PILINSKY, A. CHUPAKHIN, V. SAVCHUK**FERROMAGNETIC DISC AS A SOURCE OF INTERFERENCE AUDIO FREQUENCY RANGE**

Показано, що в результаті механічних коливань ферромагнітного диску в постійному магнітному полі через зворотній магнітострикційний ефект, виникає намагніченість, що змінюється в часі. Це означає, що металеві елементи електронного обладнання, які вібрують в магнітному полі можуть бути джерелами низькочастотних електромагнітних завад. Такі джерела механічних вібрацій мають місце в апаратній кіноконцертного комплексу. Отримані математичні співвідношення для знаходження вектору напруженості змінного магнітного поля в об'ємі вібруючого ферромагнітного диску. Представлені графіки нормованих прогинів на резонансних частотах для ферромагнітного диску заданих розмірів. Отримані результати дозволили встановити важливий фактор формування ненавмисних електромагнітних завад і становлять практичний інтерес під час проектування чутливої апаратури.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, магнітне поле, механічні вібрації, кіноконцертний зал, ферромагнітний диск, низькочастотна завада.

Показано, что в результате механических колебаний ферромагнитного диска в постоянном магнитном поле из-за обратного магнитострикционного эффекта, возникает изменяющаяся во времени намагниченность. Это означает, что металлические элементы электронного оборудования вибрирующие в магнитном поле могут быть источниками низкочастотных электромагнитных помех. Такие источники механических вибраций имеют место в аппаратной киноконцертного комплекса. Получены математические соотношения вектора напряженности переменного магнитного поля в объеме колеблющегося ферромагнитного диска. Представлены графики нормированных прогибов на резонансных частотах для ферромагнитного диска заданных размеров. Полученные результаты позволили выявить важный фактор формирования непреднамеренных электромагнитных помех и представляют практический интерес при проектировании чувствительной аппаратуры.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, магнитное поле, механические вибрации, киноконцертный зал, ферромагнитный диск, низкочастотная помеха.

It is shown that, as a result of mechanical oscillations the ferromagnetic disk in a constant magnetic field due to the inverse magnetostriction effect, leads to the magnetization varies with time. This means that metallic parts of electronic equipment, with vibration under magnetic field conditions may be the sources of low-frequency electromagnetic interference. Such sources of mechanical vibrations can take place in the cinema and concert complex hardware room. Mathematical expressions vector of intensity alternating magnetic field in the volume of the oscillating disc of ferromagnetic are derived. The normalized graphics of deflection at the resonant frequencies of the ferromagnetic disc set sizes are presented. The results revealed an important factor in the formation of unintentional electromagnetic interference and are of practical interest in the design of sensitive equipment.

Keywords: electromagnetic compatibility, magnetic field, mechanical vibrations, cinema and concert hall, ferromagnetic disc, low-frequency interference.

Introduction. The topicality of the problem of electromagnetic compatibility (EMC) in modern conditions is constantly growing because of the increasing of sensitivity devices, increasing of external interference levels and expansion of frequency bands and emergence of new functions of electronic equipment. A reasonable example is contemporary multiplex (digital cinema & concert hall) [1-4], equipped with a variety of energy saturated apparatus, high-sensitivity equipment operating in the frequency range of sound to gigahertz.

About creation of the electromagnetic environment (EME) by variety of devices in multiplex are described in [5-9].

However, in the hardware room of a cinema and concert complex specific "non-ordinary" sources of unintentional EMI sonic and ultrasonic ranges through electromechanical units [10] are identified. As a result of experimental studies, low-frequency electromagnetic fields of audible frequency range were identified in the indoor cinema and concert hall hardware with a variety of functional equipment. Note that in mobile laboratories, hardware compartment of air and space technology, etc. take place different electromagnetic interference on kilohertz frequency range that does not come from outside, but un-

intentionally form units as a part of electronic equipment.

The sources of mechanical vibrations in the cinema and concert complex hardware are: supply and exhaust ventilation system connected to the projector and the passing on hardware; operating of moving equipment units (rotation: shutter, color wheel, the work of the film path, the electric motor (the platter, table rewinder, film projector, active cooling systems)); resulting vibration of acoustic systems operation and so on.

Suppose that the plate, which is used, for instance, as electromagnetic screen, vibrates at a constant or low frequency alternating magnetic field. Mechanical vibration pre-magnetized by ferromagnetic is accompanied by deformations of small capacity of plates, which causes the turns of magnetic domains (reverse magnetostrictive effect).

Objective paper: to derive formulas determining the intensity of the alternating magnetic field as the electromagnetic interference, caused by the vibration of the metal units component into electromagnetic environment formed by a constant magnetic field.

The bending ferromagnetic disc oscillations in a constant magnetic field. Consider a disk (position 1 on Fig. 1.), the diameter $2R_0$ and thickness $2h$, and $h/R_0 \ll 1$.

The disc is rigidly fixed in a holder (position 2 in Fig. 1), which makes axial harmonic vibrations $U_0 e^{i\omega t}$, where U_0 – the displacement amplitude of the reliance displacement from the equilibrium position, other characters - generally accepted.

The whole of construction is in a constant magnetic field, the magnetic induction vector is completely determined by the axial component B_z^0 (ρ, z - the coordinate axis of the cylindrical coordinate system whose start is located in the middle plane of the disc).

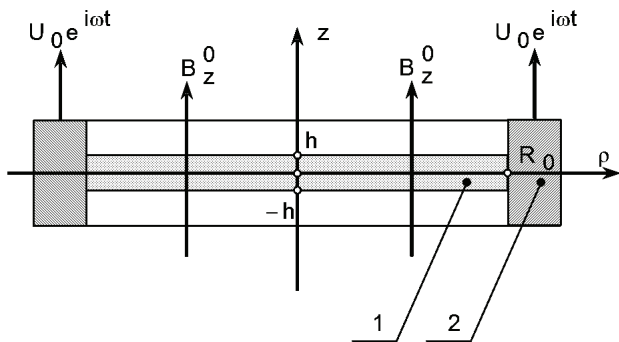


Figure 1 – Scheme to solve the ferromagnetic disc vibrations problem

Support axial vibrations form in the disk axially symmetric harmonic vibrations of lateral bending, as a result deflections appear $w(\rho)e^{i\omega t}$. The amplitude values of deflections $w(\rho)$, i.e. displacement in the axial direction of a mid-plane from of the vibrating disk of the equilibrium position, determined by the equation [11]

$$\nabla^4 w(\rho) - \lambda^4 w(\rho) = 0, \quad (1)$$

where the differential operator

$$\nabla^4 = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) \right) \right); \lambda - \text{the wave index}$$

of lateral bending of axially symmetric vibrations - $\lambda = \sqrt[4]{3\omega^2 \rho_0 R_0 (1 - \nu^2) / (Eh^2)}$; ρ_0, ν and E - density, Poisson's factor and Young's modulus of the material disc.

The general solution of equation (1):

$$w(\rho) = AJ_0(\lambda\rho) + BI_0(\lambda\rho), \quad (2)$$

where A and B are the constants that will be determined; $J_0(\lambda\rho)$ and $I_0(\lambda\rho)$ - Bessel function and the modified zero-order Bessel function.

For structure (Fig. 1) the general solution of (2) must satisfy the boundary conditions

$$w(R_0) = U_0; \quad \left. \frac{\partial w(\rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho=R_0} = 0. \quad (3)$$

By substituting (3) into expression (2), the constants A and B are determined and represented in the form:

$$w(\rho) = U_0 \frac{I_1(\lambda R_0)}{D(\lambda R_0)} \left[J_0(\lambda\rho) + I_0(\lambda\rho) \frac{J_1(\lambda R_0)}{I_1(\lambda R_0)} \right], \quad (4)$$

where $D(\lambda R_0) = J_0(\lambda R_0)I_1(\lambda R_0) + J_1(\lambda R_0)I_0(\lambda R_0)$ – determinant of the system of algebraic equations formed by substituting the expression (2) into the expression (3).

For some values of the argument λR_0 function is

equal $D(\lambda R_0) = 0$. At frequencies which correspond to the roots x_m ($m = 1, 2, \dots$) of the equation $D(x_m) = 0$ ($x = \lambda R_0$) deflections and deformations in the central part of the vibrating disk significantly increase. Obviously, these frequencies mean the resonant frequencies. For the disc size $h = 10^{-3}$ m and $R_0 = 10^{-1}$ m of the nickel brand HIP2T (Ni 98 %, Ti 2 %) [12] ($E = 215$ GPa; $\nu = 0,35$ and $\rho_0 = 8,9 \cdot 10^3$ kg/m³) the first four roots of the equation $D(x_m) = 0$, i.e. $x_1 = 3,196221$, $x_2 = 6,306437$, $x_3 = 9,439499$ and $x_4 = 12,577131$ correspond to cyclic frequency, $f_1 = 492,5$ Hz, $f_2 = 1917,5$ Hz, $f_3 = 4295,9$ Hz and $f_4 = 7626,5$ Hz. Fig. 2 shows graphs of normalized by the value U_0 deflections on the referred above four resonant frequencies. The number of the resonant frequency is shown in the figure next to the corresponding curve in the figure. The calculations were carried out under the assumption that the quality factor is 500.

Axial displacement of the disc material particles, i.e. values $u_z(\rho) = w(\rho)$ correspond to the radial shift $u_r(\rho) = -z \partial w(\rho) / \partial \rho$, where z – the distance from the mid-plane of the disk. Radial movement generate radial and circumferential strain of compression-expansion $\varepsilon_{\rho\rho} = \partial u_r(\rho) / \partial \rho$ and $\varepsilon_{\phi\phi} = u_r(\rho) / \rho$. These deformations cause twists of the magnetic domains pre-magnetized by ferromagnetic disc. Thereby, the mechanical deformations in constant magnetic field form an alternating magnetization in the capacity of ferromagnetic vibrating disc.

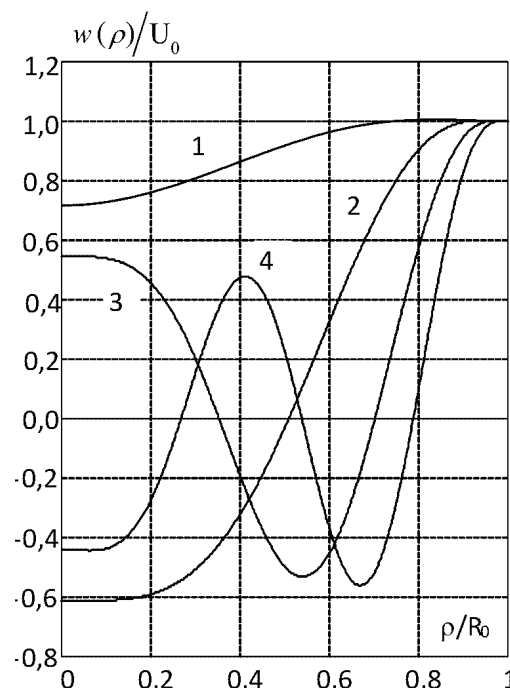


Figure 2 – Normalized deflection of the ferromagnetic disc on the first four resonance frequencies

In accordance of the linear approximation [13] general phenomenological theory of magnetostrictive effects [14] conditioned by mechanical deformations of the variable magnetization is determined by the magnetic induction vector \vec{B}^V

$$B_m^V = m_{pmnk} H_p^0 \varepsilon_{nk}; \quad p, m, n, k = 1, 2, 3, \quad (5)$$

where m_{pmnk} – isotropic tensor component of the fourth rank of magnetostrictive constants which is determined:

$$m_{pmnk} = m_2 \delta_{pm} \delta_{nk} + \frac{(m_1 - m_2)}{2} (\delta_{pn} \delta_{mk} + \delta_{pk} \delta_{mn}), \quad (6)$$

where m_1 and m_2 – magnetostrictive experimentally determined constant, and $m_2 \approx -m_1/2$; magnetostrictive constants depend on the composition of the ferromagnetic material and the magnitude of the magnetizing field [15]. Constant m_1 likely not exceed the value $1 H/m$; $\delta_{pm}, \dots, \delta_{mn}$ – Kronecker's symbols. In the formulas (5) and (6) summation over twice repeated indices is assumed. The symbols H_p^0 and ε_{nk} identify p -th components of the vector intensity of constant magnetic field and a component tensor of the deformation.

Since between symbols of the coordinate axis of a right-handed Cartesian rectangular coordinate system (x_1, x_2, x_3) and symbols of cylindrical coordinate system (ρ, ϕ, z) exist one to one correspondence $x_1 \Leftrightarrow \rho$, $x_2 \Leftrightarrow \phi$ and $x_3 \Leftrightarrow z$, then for the problem of the ferromagnetic disc vibrations Villari induction vector \vec{B}^V is completely determined by the axial component

$$B_z^V = -m_2 H_z^0 z F(\rho), \quad (7)$$

where $H_z^0 = B_z^0 / \mu_{33}^\varepsilon$ – the axial component of the vector of the constant magnetic field in the ferromagnetic disk capacity; μ_{33}^ε – magnetic permeability (a component of the tensor of the second rank) in the direction of the bias-field; $z F(\rho) = z \{ \partial^2 w(\rho) / \partial \rho^2 + [\partial w(\rho) / \partial \rho] / \rho \}$ – distribution function of volumetric deformation on the radius ρ and the thickness z of the vibratory disc.

The variable magnetic Villari induction generate within the capacity of the conductive disk low-frequency electromagnetic field, the characteristics of which must obey to the Maxwell equations. Neglecting the displacement currents, these equations are:

$$\text{rot } \vec{H} = \sigma \vec{E}; \quad (8)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -i\omega \vec{B}, \quad (9)$$

where \vec{H} and \vec{E} – time-dependent amplitude values according to the law $e^{i\omega t}$ of the vectors of the magnetic and electric field; σ – specific electric conductivity of ferromagnetic (second rank tensor components with the spherical directional surface); \vec{B} – magnetic induction vector in the capacity of deformed, pre-magnetized ferromagnetic. At linear approximation [13] m -th component of vector \vec{B} is determined as: $B_m = B_m^V + \mu_{mk}^\varepsilon H_k$, where μ_{mk}^ε – component of the permeability tensor, experimentally determined in persistence mode (equal to zero) of mechanical deformation in a capacity of a ferromagnetic; H_k – amplitude value of the time-varying k -th component, according to the law $e^{i\omega t}$, of the internal magnetic field vector, which is stipulated to the rotation of the magnetic domains in the capacity of a deformable ferromagnetic materials.

In view of the latter definition, the system of Maxwell's equations (8) and (9) can be rolled into a single equation:

$$[\text{rot rot } \vec{H}]_m + i\omega \mu_{mk}^\varepsilon H_k = -i\omega \sigma B_m^V, \quad (10)$$

where $[\text{rot rot } \vec{H}]_m$ mean m -th component of the vector.

Since the bending vibrations of the disc have axial symmetry, the peripheral component of the vector of the alternating magnetic field $H_\phi = 0$, and derivatives $\partial / \partial \phi$ of any characteristics of this field are also zero. Considering these circumstances, we obtain from (10) the system of partial differential equations:

$$-\frac{\partial^2 H_\rho}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial \rho \partial z} + i\omega \mu_{11}^\varepsilon H_\rho = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 H_\rho}{\partial \rho \partial z} - \frac{\partial^2 H_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial H_\rho}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) + i\omega \mu_{33}^\varepsilon H_z = -i\omega \sigma B_z^V, \quad (12)$$

where μ_{11}^ε – magnetic permeability in a perpendicular orientation of the constant bias-field.

The construction of the right-hand side of the equation (12), defined by (7), suggests that the solution of equations (11) and (12) can be found in the form:

$$H_\rho(\rho, z) = \sum_{k=0}^{\infty} H_\rho^{(k)}(\rho) \cos(\alpha_k z);$$

$$H_z(\rho, z) = \sum_{k=0}^{\infty} H_z^{(k)}(\rho) \sin(\alpha_k z), \quad (13)$$

where $\alpha_k = \pi(1 + 2k)/(2h)$.

Substituting the assumed solution (13) into equation (11), we obtain

$$\sum_{k=0}^{\infty} \left[H_\rho^{(k)}(\rho) (\alpha_k^2 + i\omega \sigma \mu_{11}^\varepsilon) + \alpha_k \frac{\partial H_z^{(k)}(\rho)}{\partial \rho} \right] \cos(\alpha_k z) = 0,$$

which implies that

$$H_\rho^{(k)}(\rho) = -\frac{\alpha_k}{\xi_k^2} \frac{\partial H_z^{(k)}(\rho)}{\partial \rho}, \quad (14)$$

where $\xi_k^2 = \alpha_k^2 + i\omega \sigma \mu_{11}^\varepsilon$.

Excepting with the ratio (14) the radial component $H_\rho^{(k)}(\rho)$ of the equation (12), we reduce it to form

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{\xi_k^2} \left[\frac{\partial^2 H_z^{(k)}(\rho)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z^{(k)}(\rho)}{\partial \rho} - \zeta_k^2 H_z^{(k)}(\rho) \right] \sin(\alpha_k z) = \frac{1}{\mu_{11}^\varepsilon} B_z^V, \quad (15)$$

where $\zeta_k^2 = \mu_{33}^\varepsilon \xi_k^2 / \mu_{11}^\varepsilon$.

Since the functions $\sin(\alpha_k z)$ on the interval $-h \leq z \leq h$ generate a system of orthogonal functions, i.e. the conditions are performed

$$\int_{-h}^h \sin(\alpha_k z) \sin(\alpha_m z) dz = \begin{cases} 0 \forall k \neq m, \\ h \text{ at } k = m, \end{cases}$$

it allows us to rewrite equation (15) in a more convenient form for further calculations

$$\frac{\partial^2 H_z^{(k)}(\rho)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z^{(k)}(\rho)}{\partial \rho} - \zeta_k^2 H_z^{(k)}(\rho) = -J_k(\rho), \quad (16)$$

where $J_k = \frac{8(-1)^k h \zeta_k^2 m_2 H_z^0}{[\pi(1+2k)]^2 \mu_{11}^\varepsilon} F(\rho)$.

The equation (16) is reduced to a dimensionless, relative to argument of the desired function $H_z^{(k)}$, form by multiplying by the ρ^2

$$x_k^2 \frac{\partial^2 H_z^{(k)}}{\partial x_k^2} + x_k \frac{\partial H_z^{(k)}}{\partial x_k} - x_k^2 H_z^{(k)} = -\frac{x_k^2}{\zeta_k^2} J_k(\rho), \quad (17)$$

where $x_k = \zeta_k \rho$ - dimensionless wave index.

The solution of the inhomogeneous ordinary differential equation (17) is found in the standard way of variation of constants [16], and is written

$$H_z^{(k)}(x_k) = [A_k + A_k(x_k)] I_0(x_k) + B_k(x_k) K_0(x_k), \quad (18)$$

where A_k - coefficient that have been determined, which ensures the uniqueness of the solution to the general equation (17) with zero right-hand side; $A_k(x_k)$ and $B_k(x_k)$ - varying coefficients (functions) that determine a particular solution of equation (17); $I_0(x_k)$ and $K_0(x_k)$ - modified zero-order Bessel function, and Macdonald function [17].

Variable factors $A_k(x_k)$ and $B_k(x_k)$ must satisfy condition

$$A_k'(x_k) I_0(x_k) + B_k'(x_k) K_0(x_k) = 0, \quad (19)$$

that provides a minimum of computations by solving the inhomogeneous equation (17). The dotted line in (19) denotes the first derivatives of the variable x_k .

In view of condition (19), first and second derivatives of the desired function $H_z^{(k)}(x_k)$ are calculated. Substituting these derivatives and supposed view of the solution (18) into equation (17), we obtain

$$A_k'(x_k) I_1(x_k) - B_k'(x_k) K_1(x_k) = -\frac{1}{\zeta_k^2} J_k(\rho). \quad (20)$$

Condition (19) and equation (20) form a system of algebraic equations, which are solved in a unique way relative to the quantity $A_k'(x_k)$ and $B_k'(x_k)$. Integrating the obtained results, we come to the expression for calculation of varying coefficients $A_k'(x_k)$ and $B_k'(x_k)$:

$$A_k(x_k) = -\frac{1}{\zeta_k^2} \int_0^{x_k} x J_k(\rho) K_0(x) dx;$$

$$B_k(x_k) = \frac{1}{\zeta_k^2} \int_0^{x_k} x J_k(\rho) I_0(x) dx, \quad (21)$$

where $x \equiv x_k$. After variable constants determining it can be written that

$$H_z^{(k)}(\zeta_k \rho) = A_k I_0(\zeta_k \rho) + Z_k(\zeta_k \rho); \quad (22)$$

$$H_\rho^{(k)}(\zeta_k \rho) = -\frac{\alpha_k \zeta_k}{\zeta_k^2} [A_k I_1(\zeta_k \rho) + R_k(\zeta_k \rho)], \quad (23)$$

where A_k - constants that have to be determined; functions $Z_k(\zeta_k \rho)$ and $R_k(\zeta_k \rho)$ are defined by the following relations:

$$Z_k(\zeta_k \rho) = A_k(\zeta_k \rho) I_0(\zeta_k \rho) + B_k(\zeta_k \rho) K_0(\zeta_k \rho) =$$

$$= H_0 p_k F_z^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho),$$

$$R_k(\zeta_k \rho) = A_k(\zeta_k \rho) I_1(\zeta_k \rho) - B_k(\zeta_k \rho) K_1(\zeta_k \rho) =$$

$$= H_0 p_k F_\rho^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho);$$

$$H_0 = U_0 H_z^0 \frac{hm_2}{\mu_{33}^\varepsilon R_0^2}; \quad p_k = \frac{8(-1)^k}{[\pi(1+2k)]^2};$$

$$F_z^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho) = \frac{(\lambda \zeta_k)^2 R_0^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4) D(\lambda R_0)} \{ (\lambda^2 - \zeta_k^2) I_1(\lambda R_0);$$

$$[I_0(\zeta_k \rho) - J_0(\lambda \rho)] +$$

$$+ (\lambda^2 + \zeta_k^2) J_1(\lambda R_0) [I_0(\zeta_k \rho) - I_0(\lambda \rho)];$$

$$F_\rho^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho) = \frac{(\lambda \zeta_k)^2 R_0^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4) D(\lambda R_0)};$$

$$\left\{ (\lambda^2 - \zeta_k^2) I_1(\lambda R_0) \left[\frac{\lambda}{\zeta_k} J_1(\lambda \rho) + I_1(\zeta_k \rho) \right] - \right.$$

$$\left. - (\lambda^2 + \zeta_k^2) J_1(\lambda R_0) \left[\frac{\lambda}{\zeta_k} I_1(\lambda \rho) - I_1(\zeta_k \rho) \right] \right\}.$$

Constants A_k provide the absolute convergence of series (13). An essential feature of the convergence of these series is to satisfy the limiting conditions $\lim_{k \rightarrow \infty} H_\beta^{(k)}(\zeta_k \rho) = 0$, where $\beta = \rho; z$. Sufficient sign is the final value of the sums of functions $H_\beta^{(k)}(\zeta_k \rho)$ at $k \rightarrow \infty$. Both features will be in ratios to calculate vector components of the alternating magnetic field strength in the vibrating drive only in the case where

$$A_k = -\frac{(\lambda \zeta_k)^2 (\zeta_k R_0)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4) D(\lambda R_0)} [J_1(\lambda R_0) - I_1(\lambda R_0)]. \quad (24)$$

In this case, expressions (22) and (23) take the following form

$$H_z^{(k)}(\zeta_k \rho) = H_0 p_k W_z^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho);$$

$$H_\rho^{(k)}(\zeta_k \rho) = -H_0 p_k \frac{\alpha_k \zeta_k}{\zeta_k^2} W_\rho^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho), \quad (25)$$

where

$$W_z^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho) = \frac{(\lambda \zeta_k)^2 (\lambda R_0)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4) D(\lambda R_0)} [J_0(\lambda \rho) I_1(\lambda R_0) -$$

$$- J_1(\lambda R_0) I_0(\lambda \rho)];$$

$$W_\rho^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho) = \frac{(\lambda \zeta_k)^2 (\lambda R_0)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4) D(\lambda R_0)} \frac{\lambda}{\zeta_k} [J_1(\lambda \rho) I_1(\lambda R_0) -$$

$$- J_1(\lambda R_0) I_1(\lambda \rho)].$$

Thus, the required components of the intensity vector of alternating magnetic field in the capacity of the vibrating ferromagnetic disc are defined by the following, absolutely convergent series

$$H_z(\rho, z) = H_0 W_z(\lambda, \rho, R_0) \sum_{k=0}^{\infty} p_k \frac{(\lambda \zeta_k)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4)} \sin(\alpha_k z);$$

$$H_\rho(\rho, z) = -H_0 W_\rho(\lambda, \rho, R_0) \times$$

$$\times \sum_{k=0}^{\infty} p_k \frac{\alpha_k \lambda (\lambda \zeta_k)^2}{\zeta_k^2 (\lambda^4 - \zeta_k^4)} \cos(\alpha_k z), \quad (26)$$

where

$$W_z(\lambda, \rho, R_0) = \frac{(\lambda R_0)^2}{D(\lambda R_0)} [J_0(\lambda \rho) I_1(\lambda R_0) - J_1(\lambda R_0) I_0(\lambda \rho)],$$

$$W_\rho(\lambda, \rho, R_0) = \frac{(\lambda R_0)^2}{D(\lambda R_0)} [J_1(\lambda \rho) I_1(\lambda R_0) - J_1(\lambda R_0) I_1(\lambda \rho)].$$

There are obtained formula's components of alternating magnetic intensity to give information about the electromagnetic environment formed by fluctuating ferromagnetic disc.

Conclusion. It is proved that the mechanical vibrations the ferromagnetic details with magnetic field environmental conditions are the source of unintentional low-frequency electromagnetic interference.

Substantiated and shown complex mathematical formulas for calculating the magnetic field intensity for describe the electromagnetic environment in order to use, if necessary, effective means of ensuring electromagnetic compatibility.

References:

1. *Пилинский В. В.* Анализ допустимых регламентированных уровней эмиссии и чувствительности оборудования киноконцертного комплекса / *В.В. Пилинский, А.С. Чупахин, В.Б. Швайченко, А.А. Довженко* // Технологии ЭМС. – 2015. – № 3 (54). – С. 18-25.

2. *Пилинский В.В.* Особенности обеспечения электромагнитной совместимости современного киноконцертного комплекса. Часть 3. Расчет электромагнитных полей в функционально насыщенном помещении / *В.В. Пилинский, В.Б. Швайченко, А.С. Чупахин* // Техническая электродинамика. – Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность», Тематический выпуск № 1. – 2012. – С. 135-140.

3. *Петрищев О.Н.* О природе источников электромагнитных помех звукового частотного диапазона / *О.Н. Петрищев, В.В. Пилинский, А.С. Чупахин* // Известия вузов. Радиоэлектроника (in press).

4. *Пилинский В.В.* Особенности обеспечения электромагнитной совместимости современного киноконцертного комплекса. Часть 2 – Формирование электромагнитной обстановки силовыми цепями киноконцертного оборудования / *В.В. Пилинский, М.В. Родионова, А.С. Чупахин* // Техническая электродинамика. – Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность», Тематический выпуск № 4. – 2009. – С. 3-9.

5. *Walravens C.* Efficient Reduction of Electromagnetic Interference Effects in Operational Amplifiers / *C. Walravens, S. Van Winckel, J.-M. Redout'e, M. Steyaert* // IET Electronics Letters. – Jan. 2007. – Vol. 43, №. 2. – PP. 84 – 85.

6. *Richelli A.* Design of a folded cascode opamp with increased immunity to conducted electromagnetic interference in 0.18um CMOS / *A. Richelli, G. Matig-A, J.-M. Redout'e* // Elsevier Microelectronics Reliability. – Mar. 2015. – Vol. 55, № 3-4. – PP. 654-661.

7. *Elliott Cole* Reducing electromagnetic interference (EMI) with low voltage differential signaling (LVDS) / *Elliott Cole* // Available at: <http://www.ti.com/lit/an/slla030c/slla030c.pdf> (accessed 5 March 2016).

8. *Armstrong K.* AES-X13 and Interference-free Pro-audio Systems / *K. Armstrong, T. Waldron* // IEEE International Symposium «EMC 2002», Sorrento, Italy, 2002. – Vol. 1. – PP. 434-439.

9. *Ott H.W.* Electromagnetic Compatibility Engineering / *H.W. Ott.* – New York: Wiley Publ. 2009. – 843 p.

10. *Petrishchev O.* Electroacoustic effects as motive of power electronics units EMI generation / *O. Petrishchev, V. Pilinsky, M. Rodionova, V. Shvaichenko* // 19th International Wroclaw Symposium & Exhibition on Electromagnetic Compatibility (EMC-2008): Wroclaw, June 11-13 Proceeding, 2008. – PP. 405 – 410.

11. *Доннел Л.Г.* Балки, пластины и оболочки / *Л.Г. Доннел.* – М.: Наука, 1982. – 567 с.

12. Физические величины: Справочник / *А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский* и др.; Под ред. *И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова.* – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

13. *Петрищев О.Н.* Гармонические колебания пьезоэлектрических элементов. Часть 1. Гармонические колебания пьезоэлектрических элементов в вакууме и метод резонанса – антирезонанса / *О.Н. Петрищев.* – К.: Аверс, 2012. – 300 с.

14. *Власов К.Б.* Некоторые вопросы теории упругих ферромагнитных (магнитострикционных) сред / *К.Б. Власов* // Изв. АН СССР. Сер. физическая. – 1957. – Т. 21, № 8. – С. 1140-1148.

15. *Сыркин Л.Н.* Пьезомагнитная керамика / *Л.Н. Сыркин.* – Л.: Энергия, 1980. – 208 с.

16. Курс обыкновенных дифференциальных уравнений / *Еругин Н.П., Штокало И.З.* и др. – К.: Вища школа, 1974. – 472 с.

17. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. *М. Абрамовица, И. Стиган.* – М.: Наука, 1979. – 832 с.

Bibliography (transliterated):

1. *Pilinskij V.V., Chupahin A.S., Shvajchenko V.B., Dovzhenko A.A.* Analiz dopustimyh reglamentirovannyh urovnej jemissii i chuvstvitel'nosti oborudovaniya kinokonzertnogo kompleksa. Tehnologii JeMS. 2015. No 3 (54), pp.18-25.

2. *Pilinskij V.V., Shvajchenko V.B., Chupahin A.S.* Osobennosti obespechenija jelektromagnitnoj sovместimosti sovremennogo kinokonzertnogo kompleksa. Chast' 3. Raschet jelektromagnitnyh polej v funkcional'no nasysshennom pomeshhenii. Tehnicheskaja jelektrodinamika. Tematicheskij vypusk "Silovaja jelektronika i jenergojefektivnost' ". Tematicheskij vypusk No 1. 2012. pp. 135-140.

3. *Petrishhev O.N., Pilinskij V.V., Chupahin A.S.* O prirode istochnikov jelektromagnitnyh pomeh zvukovogo chastotnogo diapazona. Izvestija vuzov. Radiojelektronika (in press).

4. *Pilinskij V.V., Rodionova M.V., Chupahin A.S.* Osobennosti obespechenija jelektromagnitnoj sovместimosti sovremennogo kinokonzertnogo kompleksa. Chast' 2 – Formirovanie jelektromagnitnoj obstanovki silovimi cepjami kinokonzertnogo oborudovaniya. Tehnicheskaja jelektrodinamika. Tematicheskij vypusk "Silovaja jelektronika i jenergojefektivnost' ", Tematicheskij vypusk No 4. 2009. pp. 3-9.

5. *Walravens C., Van Winckel S., Redout'e J.-M., Steyaert M.* Efficient Reduction of Electromagnetic Interference Effects in Operational Amplifiers. IET Electronics Letters, Jan. 2007, Vol. 43, No 2, pp. 84-85.

6. *Richelli A., Matig-A G., Redout'e J.-M.* Design of a folded cascode opamp with increased immunity to conducted electromagnetic interference in 0.18um CMOS. Elsevier Microelectronics Reliability, Mar. 2015, Vol. 55, No 3-4, pp. 654-661.

7. *Elliott Cole.* Reducing electromagnetic interference (EMI) with low voltage differential signaling (LVDS). Available at: <http://www.ti.com/lit/an/slla030c/slla030c.pdf> (accessed 5 March 2016).

8. *Armstrong K., Waldron T.* AES-X13 and Interference-free Pro-audio Systems. IEEE International Symposium "EMC

2002", Sorrento, Italy, 2002, Vol. 1, pp. 434-439.

9. Ott H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. New York: Wiley Publ. 2009. 843 p.

10. Petrishev O., Pilinsky V., Rodionova M., Shvaichenko V. Electroacoustic Effects as Motive of Power Electronics Units EMI Generation. 19th International Wroclaw Symposium & Exhibition on Electromagnetic Compatibility (EMC-2008), Wroclaw, June 11-13 Proceeding, 2008, pp. 405-410.

11. Donnel L. G. Balki, plastiny i obolochki. Moscow: Nauka, 1982. 567 p.

12. Fizicheskie velichiny: Spravochnik. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskij A.M. i dr.; Pod red. Grigor'eva I.S., Mejliхова E.Z. Moscow: Jenergoatomizdat, 1991. 1232 p.

13. Petrishhev O.N. Garmonicheskie kolebanija p'e-

zokeramicheskikh jelementov. Chast' 1. Garmonicheskie kolebanija p'ezokeramicheskikh jelementov v vakuume i metod rezonansa – antirezonansa. Kyiv: Avers, 2012. 300 p.

14. Vlasov K. B. Nekotorye voprosy teorii uprugih ferromagnitnyh (magnitostrikcionnyh) sred. Izv. AN SSSR. Ser. fizicheskaja. 1957. Vol. 21. No 8. pp. 1140-1148.

15. Syrkin L. N. P'ezomagnitnaja keramika. Leningrad: Jenergija, 1980. 208 p.

16. Kurs obyknovennyh differencial'nyh uravnenij. Erugin N.P., Shtokalo I.Z. i dr. Kyiv: Vishha shkola, 1974. 472 p.

17. Spravochnik po spetsialnym funktsijam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami. Pod red. Abramovitsa M., Stigan I. Moscow: Nauka, 1979. 832 p.

Надійшла (received) 10.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Ферромагнітний диск - джерело завад звукового діапазону частот / О.М. Петрищев, В.В. Пілінський, О.С. Чупахін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – X.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 111-116. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-0740.

Ферромагнітний диск – источник помех звукового диапазона частот / О.Н. Петрищев, В.В. Пилинский, А.С. Чупахин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – X.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 111-116. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-0740.

Ferromagnetic disc as a source of interference audio frequency range / O.N. Petrishev, V.V. Pilinsky, A.S. Chupakhin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 111-116. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Петрищев Олег Миколайович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; тел.: (066) 766-31-33; e-mail: petrishev@ukr.net.

Петрищев Олег Николаевич – доктор технических наук, профессор Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; тел.: (066) 766-31-33; e-mail: petrishev@ukr.net.

Petrishev Oleg Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", tel.: (066) 766-31-33; e-mail: petrishev@ukr.net.

Пілінський Володимир Володимирович - кандидат технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; тел.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net.

Пилинский Владимир Владимирович – кандидат технических наук, профессор Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; тел.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net.

Pilinsky Vladimir Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", tel.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net.

Чупахін Олександр Сергійович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», тел.: (050) 698-67-77; e-mail: chupe@ukr.net.

Чупахин Александр Сергеевич – аспирант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», тел.: (050) 698-67-77; e-mail: chupe@ukr.net.

Chupakhin Olexander Sergeevich – Postgraduate, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", tel.: (050) 698-67-77; e-mail: chupe@ukr.net.

Савчук Віталій Олегович – магістрант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», тел.: (093) 271-37-70; e-mail: vetal.ipod4@gmail.com

Савчук Виталий Олегович – магистрант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», тел.: (093) 271-37-70; e-mail: vetal.ipod4@gmail.com

Savchuk Vitalii Olegovich – undergraduate, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", tel.: (093) 271-37-70; e-mail: vetal.ipod4@gmail.com

ЗМІСТ

Баранов М.И. Приближенный расчет активного сопротивления плазменного канала искрового разряда в высоковольтном сильноточном воздушном коммутаторе атмосферного давления	5
Баранов М.И., Коробко А.А. Анализ влияния диэлектрических потерь на метрологические характеристики диэлькометрического резонансного метода определения влагосодержания в эмульсии типа «трансформаторное масло – вода»	12
Бондаренко А.Ю., Куприянов А.С. Энергосберегающий коттедж для инженерно-технического персонала, работающего в полевых условиях	17
Ваврів Л.В., Іванов В.М., Марценюк В.Є., Мірзоєв Р.С. Пристрої для отримання імпульсів високої напруги в електротехнології	23
Гулько В.И., Дмитришин А.Я., Топоров С.О. Электрофизические характеристики комбинированного пленочного диэлектрика на основе полипропиленовой и полиэтилентерефталатной пленок	31
Денисюк Т. Д., Рачков А. Н. Возможности повышения эффективности электроразрядных технологий разрушения	35
Журахівський А.В., Бінкевич Т.В., Ліщак І.В. Дослідження впливу метеорологічних умов на оцінку надійності грозозахисту повітряних ліній електропередавання	39
Колиушко Д. Г., Руденко С. С., Колиушко Г.М. Анализ состояния заземляющих устройств действующих энергообъектов Украины	44
Коробко А.И., Коробко З.И. Методика физического моделирования нестационарных импульсных электромагнитных процессов в сверхширокополосных антеннах во временном представлении	49
Кравченко В.И., Бреславец В.С., Князев В.В., Яковенко И.В. Излучение поверхностных поляритонов модулированным потоком заряженных частиц	56
Кравченко В.И., Бреславец В.С., Князев В.В., Яковенко И.В. Излучение наведенных токов с неоднородным потенциалом на границе	62
Кравченко В.И., Бреславец В.С., Князев В.В., Яковенко И.В. Переходное излучение токов, наведенных внешним излучением, на неоднородных границах раздела сред	67
Кускова Н.И., Корзинова А.Н., Хайнацкий С.А., Ющишина А.Н., Челпанов Д.И. Методы утилизации углеродсодержащих отходов	73
Кускова Н.И., Челпанов Д.И. Высокотемпературный синтез углеродных наноматериалов	79
Немченко Ю.С. Прогнозирование возможности проведения в НИПКИ «Молния» испытания объектов военной техники на электромагнитную совместимость по стандартам НАТО	84
Хайнацкий С.А. К вопросу о классификации электрического взрыва проводников в жидкости	92
Шаламов С.П. Особенности формирования импульсного электромагнитного поля в полосковой линии	98
Шутенко О.В. Анализ законов распределения скоростей нарастания газов в высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения	103
Petrishchev O., Pilinsky V., Chupakhin A., Savchuk V. Ferromagnetic disc as a source of interference audio frequency range	111

CONTENTS

Baranov M.I. A close calculation of active resistance of plasma channel of a spark discharge is in a high-voltage heavy-current air switchboard atmospheric pressure	5
Baranov M.I., Korobko A.A. Analysis of the effect of dielectric losses on the metrological characteristics of the dielectric-resonance method for determining moisture content in an emulsion of the type «transformer oil – water»	12
Bondarenko A.Yu., Kupriyanov A.S. Energy saving cottage for engineering personnel working in the field	17
Vavriv L.V., Ivanov V.M., Martsenyuk V.E., Merzoev R.S. Devices for obtaining high voltage pulses in electro-technologies	23
Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ya., Toporov S.O. Electrophysical characteristics of the combined film dielectric based on polypropylene and polyethylene terephthalate films	31
Denisyuk T.D., Rashkov A.N. The possibilities of increasing the efficiency of electrical discharge technologies of destruction	35
Zhurahovskiy A.V., Binkevych T.V., Lishchak I.V. Research of influence of the meteorological conditions to the evaluation of there liability of lightning protection of overhead transmission lines	39
Koliushko D.G., Rudenko S.S., Koliushko G.M. Analysis state of grounding grids of existing power plants of Ukraine	44
Korobko A.I., Korobko Z.I. Method of physical modelling of electromagnetic processes in ultra-wideband antennas in time representation	49
Kravchenko V.I., Breslavets V.S., Knyazev V.V., Yakovenko I.V. Radiation of surface polaritons by a modulated flow of charged particles	56
Kravchenko V.I., Breslavets V.S., Knyazev V.V., Yakovenko I.V. Radiation of induced currents with inhomogeneous potential of the border	62
Kravchenko V.I., Breslavets V.S., Knyazev V.V., Yakovenko I.V. Transition radiation of currents inducted by external radiation on inhomogeneous border of surroundings separation	67
Kuskova N.I., Korzinova A.N., Khainatskiy S.A., Yushishina A.M., Chelpanov D.I. Methods of recycling of carbon-containing waste products	73
Kuskova N.I., Chelpanov D.I. High-temperature synthesis of carbon nanomaterials	79
Nemchenko Y.S. Prediction of the possibility of NIPKI «Molnija» test of objects of military equipment on EMC to NATO standards	84
Khainatskiy S.A. On the classification of electrical explosion of conductors in liquid	92
Shalamov S.P. Formation of the impulse electromagnetic field in the strip line	98
Shutenko O.V. The analysis of laws of speeds distribution of gases increase in high-voltage transformers of not tight manufacturing	103
Petrishchev O., Pilinsky V., Chupakhin A., Savchuk V. Ferromagnetic disc as a source of interference audio frequency range	111

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Збірник наукових праць

Серія:

Техніка та електрофізика високих напруг

№ 15 (1237) 2017

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 № 15-17.

Підп. до друку 19.04.2017 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. Данилевського, 30
