

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCES OF UKRAINE

National technical university  
"Kharkiv polytechnic institute"

## **ВІСНИК**

**Національного  
технічного університету «ХПІ»  
Серія: Техніка та електрофізика  
високих напруг**

**№ 14 (1290) 2018**

**Збірник наукових праць**

**Видання засноване у 1961 р.**

**Харків  
НТУ «ХПІ», 2018**

## **BULLETIN**

**of the National  
Technical University "KhPI"  
Series: Technique and  
Electrophysics of High Voltage**

**No. 14 (1290) 2018**

**Collection of Scientific papers**

**The publication was founded in 1961**

**Kharkiv  
NTU "KhPI", 2018**

**Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».** Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2018. – № 99 (1999). – 84 с. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print)

В збірнику представлено теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконали викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками різних організацій та установ. Для викладачів, наукових співробітників, спеціалістів.

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

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» Серія: Техніка та електрофізика високих напруг.** 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.

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)**.

Засновник  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

Founder  
National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Головний редактор**

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

**Заст. головного редактора**

Марченко А.П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

**Секретар**

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

**Редакційна колегія серії**

*Відповідальний редактор:*

В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.

*Відповідальний секретар:*

Л. В. Ваврив, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співр.

*Члени редколегії:*

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

М. І. Бойко, д-р техн. наук, доц.;

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.;

О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.;

Є. І. Сокол, д-р техн. наук, проф.;

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

Х. Радев, проф., Технічний ун-т, Софія, Болгарія;

Ф. Д'Алессандро, д-р філ., компанія PhysElec, Тасманія, Австралія;

С. Гржибовські, проф., Державний ун-т Міссісіпі, США;

М. Рок, проф., Технічний ун-т Ільменау, Німеччина

**Editor-in-chief**

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of NAS of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

**Deputy editor-in-chief**

Marchenko A.P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

**Secretary**

Gorbunov K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff

*Associate editor:*

V. Kravchenko, Prof., Dr. Tech. Sci.

*Executive secretary:*

L. Vavriv, PhD. Phys.-Math. Sci., Senior Researcher.

*Editorial staff members:*

M. Baranov, Dr. Tech. Sci., Main Res. – deputy editor-in-chief;

M. Boiko, Dr. Tech. Sci., Prof.;

A. Gurin, Dr. Tech. Sci., Prof.;

B. Klimentenko, Dr. Tech. Sci., Prof.;

V. Knyazev, PhD. Tech. Sci., Leading Researcher;

O. Serkov, Dr. Tech. Sci.,

E. Sokol, Dr. Tech. Sci., Prof.;

I. Yakovenko, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof.;

H. Radev, Prof., Technical university of Sofia, Bulgaria;

F. D'Alessandro, PhD, SMIEE, PhysElec, Tasmania, Australia;

S. Grzybowski, Dr. Hab., PhD, LF IEEE, Prof. Mississippi State University, USA;

M. Rock, Prof., Dr-Ing., Technical University Ilmenau, Germany

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».  
Протокол № 3 від 30 березня 2018 р.

***В.М. БАКІКО, О.П. ГРЕБІНЬ, В.Б. ШВАЙЧЕНКО***

### **ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ІМПЕДАНСУ МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗАВАД ЗВУКОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

Проведено аналіз впливу реальних умов застосування протизавадних фільтрів звукотехнічних систем, підключених до електромережі змінного струму на вношуване загасання в порівнянні з стандартизованим рівнем, визначеним за методом генератор-вольтметр. Досліджено діапазон зміни імпедансу електромережі за особливостями часу та місця застосування. Проведено порівняння розрахункових даних з експериментальними, на основі якого зроблені висновки про необхідність поточного виміру імпедансу та налаштування параметрів протизавадного фільтра в реальному часі. Запропоновано алгоритм для програмування системи керування адаптивним протизавадним фільтром за критерієм неузгодженості опорів.

**Ключові слова:** вношуване загасання, електромагнітна сумісність, імпеданс електромережі, звукотехнічна система, протизавадний фільтр, радіозавади.

***В.Н. БАКИКО, А.П. ГРЕБИНЬ, В.Б. ШВАЙЧЕНКО***

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПЕДАНСА СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФИЛЬТРАЦИИ ПОМЕХ**

Проведен анализ влияния реальных условий применения помехоподавляющих фильтров звукотехнических систем, подключенных к электросети переменного тока на вносимое затухание по сравнению с стандартизированным уровнем, определенным методом генератор-вольтметр. Исследован диапазон изменения импеданса электросети в зависимости от времени и места применения. Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными, на основе которого сделаны выводы о необходимости текущего измерения импеданса и перенастройки параметров помехоподавляющего фильтра в реальном времени. Предложен алгоритм для программирования системы управления адаптивным помехоподавляющим фильтром по критерию рассогласованности сопротивлений.

**Ключевые слова:** вносимое затухание, звукотехническая система, импеданс электрической сети, помехоподавляющий фильтр, радиопомехи, электромагнитная совместимость.

***V.N. BAKIKO, A.P. GREBIN, V.B. SHVAICHENKO***

### **CALCULATION OF THE INFLUENCE OF AC MAINS IMPEDANCE ON THE EFFICIENCY OF INTERFERENCE FILTERING**

The influence of real conditions for the application of RFI-filters of audiosystems connected to the AC mains on the insertion loss is compared with the standardized level determined by the generator-voltmeter method. The range of the change in the impedance of the mains as a function of time and place of application was investigated. Comparison of calculated data with experimental ones is made, on the basis of which conclusions are drawn about the need for real time measurement of impedance and adjusting of the parameters of the RFI-filter. An algorithm is proposed for programming the control system of an adaptive RFI-filter by the criterion of resistance mismatch.

**Keywords:** audio system, attenuation, electromagnetic compatibility, impedance of the electrical network, interference, radiofrequency interference filter.

**Вступ.** Основним фактором, що визначає якість відтворюваного/відновлювального звукового файлу сучасних звукотехнічних систем (ЗТС) є співвідношення «сигнал/завада» у визначених діапазонах частот [1, 2].

Рівень корисного сигналу може змінюватися в межах від порогу чутливості слуху людини включно до болювого порогу за динамічного діапазону 120-140 дБ. Рівень завад залежить як від структури ЗТС, типу носія, якості базової фонограми, так і від індустриальних радіозавад (ІРЗ), що можуть погіршувати сприйняття аудіо контенту, поширюючись як кондуктивними шляхами, зокрема, в електромережу, імпеданс якої нормують [3, 4], так і через наведення та випромінювання з безпосереднім впливом, зокрема, на електродинамічні гучномовці. Проблеми забезпечення елект-

ромагнітної сумісності електронних засобів, до яких належать ЗТС, присвячено значну кількість досліджень [5-7], в яких доведено, що найбільш ефективними засобами обмеження ІРЗ кондуктивними шляхами є протизавадні фільтри (ПЗФ), а захист від наведень та випромінювання, зазвичай, забезпечують екрануванням. Однак саме для ЗТС цю проблему ускладнює, по-перше, те, що завади і корисний сигнал концентровано в низькочастотному (НЧ) діапазоні, живлення від мережі змінного струму таких систем потребує застосування джерел вторинного електроживлення (ДВЕЖ), що призводить до появи відповідних гармонік частоти електромережі, які також є завадами, оскільки потрапляють в діапазон звукових сигналів. Звуковий контент також впливає на вибір діапазонів, окрім того, завади, які впливають на ЗТС, залежать від

технології звукозапису і типу носія. Цифрові сучасні методи обробки звуку призвели до зменшення потужності завад з низькочастотної області у високочастотну.

Налаштування параметрів ПЗФ для обмеження завад в низькочастотній області потребує застосування конденсаторів та дроселів з більшим значенням основного параметру, що зумовлює як збільшення габаритів таких засобів, так і внаслідок впливу паразитних параметрів зсуває резонансні частоти ланок ПЗФ також в область НЧ, обмежуючи ефективність [8]. По-друге, ефективність фільтрації залежить також від імпедансів як джерела завад, так і рецептора, які, в свою чергу змінюються в часі випадковим чином [9].

Крім того, відома залежність імпедансу  $Z_i$ , що можливо визначити за дослідями холостого ходу та короткого замикання [4]

$$Z_i = 50U_{o.c.} / U_{s.c.} |_{R_L=50\Omega} \quad (1)$$

де  $U_{o.c.}$  – напруга холостого ходу за нормованого значення опору навантаження  $R_L=5$  кОм;  $U_{s.c.}$  – напруга короткого замикання за нормованого значення опору навантаження  $R_L = 50$  Ом.

Інші відомі методи визначення імпедансу, а саме метод трьох вольтметрів, метод струму-напруга та метод генератор-вольтметр також потребують додаткових елементів та застосування непрямого методу вимірювання.

Така істотна складність визначення імпедансу показує, що дослідження впливу зміни імпедансу електромережі на ефективність обмеження IP3 ЗТС та розробка рекомендацій щодо підвищення такого обмеження є актуальною науковою й практичною задачею.

**Мета** даної роботи – визначення можливості моніторингу значень імпедансу електромережі змінного струму для налаштування параметрів ПЗФ таким чином, щоб досягнути збільшення вношуваного загасання в області НЧ в реальному часі.

**Основна частина.** Рівень завад суттєво залежить від повного опору мережі, оскільки він являється опором навантаження для завад при поширенні останніх від ДВЕЖ до мережі живлення. Повний опір мережі змінний в часі і визначається певними умовами і режимами роботи: довжиною електромережі, площею поперечного перерізу провідників, повним опором споживачів, які під'єднано до цієї електромережі. Результати вимірювань, проведені для наземних електромереж [9], наведено на рис. 1.

Багаточисельні вимірювання показали, що в діапазоні радіочастот від 0,10 до 30 МГц повний опір електромережі може знаходитися в межах від 5 Ом за мінімальною імовірністю 20% до 500 Ом. Розроблена в середовищі Multisim Workbench модель протизавадного фільтру, дозволила оцінити загасання, що вносить фільтр (в діапазоні частот від 10 кГц до 30 МГц), для різних значень повного опору мережі  $Z_i$ . Результати моделювання показали зміну вношуваного фільтром загасання на 10 дБ при зміні імпедансу мережі втричі, що вимагає опера-

тивної оцінки імпедансу електромережі в частотній області від 1 МГц до 30 МГц (рис. 2).

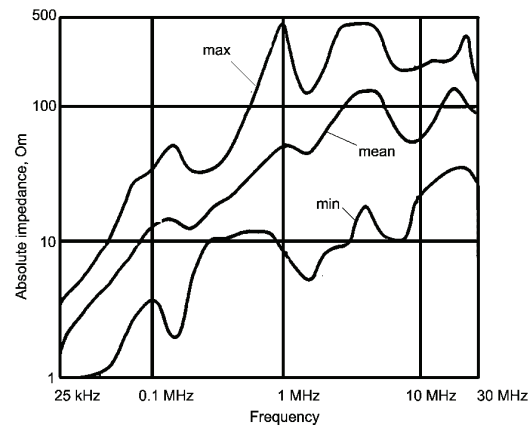


Рисунок 1 – Залежність імпедансу «фаза-нейтраль» від частоти за розподілу ймовірності

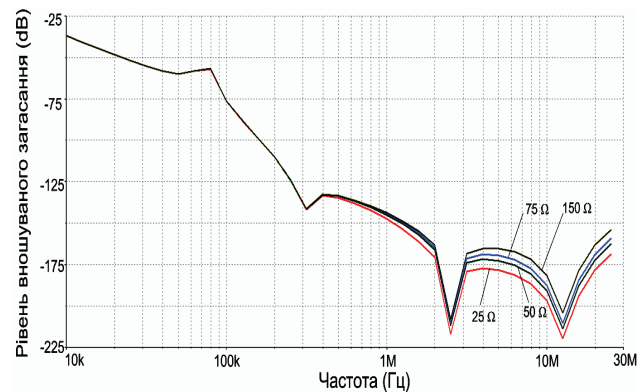


Рисунок 2 – Вплив імпедансу мережі на ефективність фільтрації ВЧ ланки ПЗФ

Відомі підходи щодо підвищення ефективності ПЗФ завдяки адаптивному керуванню його основними та паразитними параметрами за критерієм визначення поточної електромагнітної обстановки [8]. При цьому в структуру ПЗФ долучають інтелектуальний складник на основі мікроконтролера або цифрового сигнального процесора [2] та кола керування ланками ПЗФ [10]. Однак зазначений підхід не враховує відхилення імпедансу мережі, який призводить до зменшення ефективності ПЗФ, яке ілюструє рис. 2.

Розроблено схему та алгоритм вимірювання імпедансу мережі на базі методу «генератор-вольтметр» з дворівневою процедурою збору даних (рис. 3) – для того, щоб повністю врахувати ефект впливу напруги живлення електромережі на вимірювання імпедансу. Перед введенням імпульсу струму збудження для вимірювання імпедансу, впродовж 160 мс (8 циклів мережі живлення з частотою 50 Гц) записуються значення напруги і струму. Наступний запис на інтервалі 160 мс відбувається з моменту введення струму збудження. Різниця записаних даних до і після введення струму збудження повністю враховує напругу мережі. Вибірки по 160 мс дозволяють забезпечити розрізнявальну частоту в 6,25 Гц (вікно дискретизації може бути зменшено, якщо потрібно отримати меншу розрізнявальну здатність по частоті).

Долучення в структуру ПЗФ додаткових елементів не впливає суттєвим чином на габарити та вартість, в той же час дозволяє значно розширити функціональні можливості, зокрема, як елемент майбутньої інформаційної мережі. Додаткова обмотка дроселя [10] забезпечує швидке налаштування частотної характеристики ПЗФ таким чином, щоби максимуму вношуваного загасання зміщувалися за частотою залежно від поточного значення імпедансу мережі (див. рис. 2).

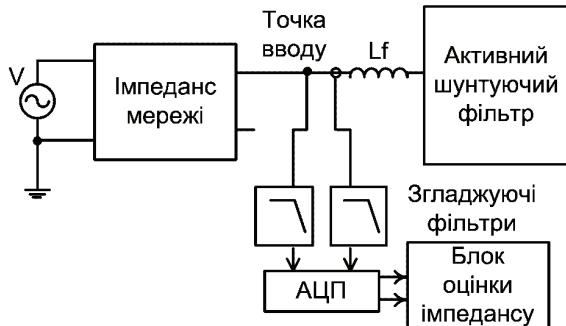


Рисунок 3 – Структурна схема визначення імпедансу мережі

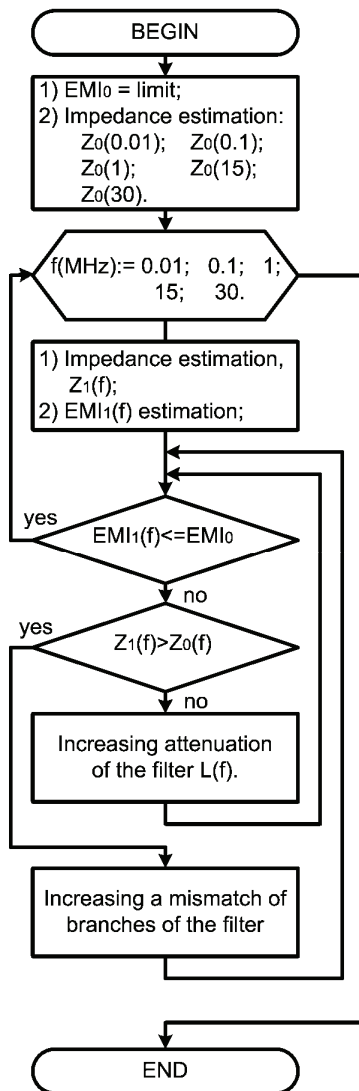


Рис. 4 – Алгоритм роботи інтелектуального ПЗФ з адаптивним керуванням при зміні імпедансу мережі

Мікроконтролер, що входить до «блоку оцінки імпедансу» повинен керувати процесом переналаштування параметрів інтелектуального фільтру з адаптивним керуванням і повністю реалізовувати розроблений алгоритм інтелектуального складника схеми фільтрації (рис. 4).

Основна ідея розробленого алгоритму полягає в наступному:

– якщо імпеданс електромережі не змінюється, але при цьому не забезпечуються електромагнітна сумісність, то необхідно збільшити вношуване фільтром загасання;

– якщо електромагнітну обстановку погіршує зміна повного опору мережі, то необхідно переналаштувати параметри ланок фільтру.

Додатково необхідно оперативно визначати частотний діапазон, в якому виникає погіршення ЕМО і порушено умови ЕМС. Рекомендовано розподілити частотну смугу 10 кГц – 30 МГц на піддіапазони, кількість яких залежить від кількості ланок інтелектуального фільтру, межі діапазонів визначають параметрами відповідної ланки. Звуковий контент також впливає на вибір діапазонів, окрім того, завади, які впливають на ЗТС, залежать від технології звукозапису і типу носія. Цифрові сучасні методи обробки звуку призвели до зменшення потужності завад з низькочастотної області у високочастотну. Якщо обчислюваних можливостей застосовного мікроконтролера недостатньо в разі швидкої зміни імпедансу мережі, то може виникнути необхідність застосування розподілених хмарних обчислень, що знімає обмеження як на швидкодії, так і обсяг пам'яті на кристалі мікроконтролера.

**Висновки.** Для визначення повного опору мережі електроживлення в автоматичному режимі необхідно забезпечити змінювану селективність вимірювача напруг і обробку в реальному часі відліків. Продуктивність сучасних цифрових сигнальних процесорів вже дозволяє вирішувати такі завдання в режимі реального часу. Визначення поточного значення імпедансу мережі електроживлення підвищить ефективність адаптивного ПЗФ завдяки налаштуванню резонансних частот його ланок до 10 дБ. Це технічне рішення дозволяє уникнути обмежень щодо коефіцієнту запасу на вношуване загасання ПЗФ у 6 дБ внаслідок запропонованого адаптивного поновлення ефективності фільтрації в разі зміни імпедансу електромережі в реальних умовах використання звукотехнічних систем, чутливих до імпульсних завад.

#### Список літератури:

1. Бакико В.М. Особенности электромагнитной совместимости в звукотехнических телекоммуникационных системах / Бакико В.М., Шарадга Осман // IV Міжнародна наук.-техн. конф. молодих вчених «Електроніка 2011». Част. 2: 36. статей. – К.: 2011. – С. 236-244.
2. Пілінський В.В. Програмно-технічна система забезпечення захисту інформаційних ресурсів по колам електроживлення / В.В.Пілінський, В.Б. Швайченко, О.О. Довженко, В.М. Бакико // Інформаційні технології в освіті. – 2010. – Вип. 7. – С. 170-174.

3. Bakiko V. Features of power-line impedance effects on EMI filter performance / V. Bakiko, A. Alizadeh, V. Shvaichenko, A. Vlasnyuk // Proceedings of 9th international symposium on EMC joint with 20th international Wroclaw symposium on EMC «EMC EUROPE 2010». – Wroclaw, Poland: 2010. – P. 804-809.
4. Haruta Hiroshi Impedance Measurement Handbook / Hiroshi Haruta, 2nd Edition, Agilent Technologies, 2000. (Режим доступу <http://krypton2035.free.fr/Resources/Impedance%20Measurement%20Book.pdf>, дата доступу 2018-03-04).
5. Nave M.J. Power Line Filter Design for Switched Mode Power Supplies / Mark J. Nave. – 2nd Edition Hardcover. – 2010. – 186 p.
6. Кечиев Л.Н. ЭМС и информационная безопасность в системах телекоммуникации / Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. – 320 с.
7. Векслер Г.С. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания / Г.С. Векслер и др. – К.: Техніка, 1990. – 167 с.
8. Пілінський В.В. Особливості мікропроцесорного керування параметрами дроселя протизаводового фільтра для керування характеристиками загасання в смузі частот 3...5 декад / В.В.Пілінський, С.М. Веретюк, А.О. Довженко, В.Б. Швайченко // Електроніка і зв'язь. Тем. вып. «Електроніка і нанотехнології». – 2011. – № 4. – С. 182-187.
9. Neto J.P. Measurement of Japanese Indoor Power-line Channel / J.P. Neto, S. Tsuzuki, Y. Kawakami, Y. Yamada // Proc. 7th International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications. – Kyoto, Japan: March, 2003. – P. 243-247.
10. Патент України на корисну модель №113440. МПК H03H 7/075 (2006.01), H02K 11/02 (2016.01). Протизаводний фільтр / О.О. Довженко, О.М. Зінко, В.Б. Швайченко, Осман Шараджа. – Бюл. № 2 від 25.01.2017 р.

#### References (transliterated):

1. Bakiko V.N. Othman Sharadjah Features of electromagnetic compatibility of audio parts of telecommunication systems. IV Mignarodna konferencija molodyh vchenyh [IV International science-technical of young scientist "Electronics 2011"] Part 2. Kyiv: 2011. P. 236-244. (Russian).
2. Pilinskij V. V., Bakiko V.M., Dovzhenko O.O., Shvaichenko V.B. Programno-tehnichna sistema zabezpechennja zahystu

informacijnyh resursiv po kolam elektrozhivlennja.[Software-technical system of information resource safety in power circuits]. Informacijni tehnologii v osviti. [Information technology of education] .No. 7, 2010. P.170–174. (Ukrainian).

3. Bakiko V., Alizadeh A., Shvaichenko V., Vlasnyuk A. Features of power-line impedance effects on EMI filter performance. Proceedings of 9th international symposium on EMC joint with 20th international Wroclaw symposium on EMC "EMC EUROPE 2010". Wroclaw, Poland, 2010. P. 804-809.
4. Hiroshi Haruta Impedance Measurement Handbook, 2nd Edition, Agilent Technologies, 2000. (Available form <http://krypton2035.free.fr/Resources/Impedance%20Measurement%20Book.pdf>, dated as 2018-03-04).
5. Nave M.J. Power Line Filter Design for Switched Mode Power Supplies, 2nd Edition Hardcover. 2010. 186 p.
6. Kechiev, L. N., Stepanov P.V. EMS i informacionnaja bezopasnost' v sistemah telekommunikacij [EMC and information safety in telecommunication systems]. Moskow: Izdatelskij dom Tehnologiji, 2005. 320 p. (Russian).
7. Veksler, G.S. et al. Podavlenije elektromagnitnyh pomeh v cepjah elektropitanija [Suppression of electromagnetic interferences on power supplies]. Kyiv: Technika, 1990. 167p. (Russian).
8. Pilinskij V. V., Veretjuk S.M., Dovgenko A.O., Shvaichenko V.B. Osoblivosti mikroprocesornogo keruvannja parametrami drosselja protyzavodovogo fil'tra dlja keruvannja harakteristikami zagassannja v smuzi chastot 3-5 dekad [ Features of microprocessor control of RFI-filter choke parameters in frequency range of 3-5 decade]. Elektronika i svjaz. Tem. vypusk: Elektronika i nanotehnologii [Electronics and telecommunication. Special issue Electronics and nanotechnology]. No. 4. 2011. P.182-185.
9. Neto J.P., Tsuzuki S., Kawakami Y., Yamada Y. Measurement of Japanese Indoor Power-line Channel. Proc. 7th International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications. Kyoto, Japan: March, 2003. P. 243-247.
10. Patent of Ukraine for utility model №113440. МПК H03H 7/075 (2006.01), H02K 11/02 (2016.01). Protызavodnyi filtr [Radiofrequency interference filter]. O.O. Dovgenko, O.M. Zinko, V.B. Shvaichenko, Othman Sharadjah. Bul. № 2 of 25.01.2017 (Ukrainian).

Надійшла (received) 01.03.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Бакіко Вадим Миколайович (Бакіко Вадим Николаевич, Bakiko Vadym Nikolaevich)** – асистент кафедри звукотехніки та реєстрації інформації, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, м. Київ; тел.: (+38044) 204-80-80; e-mail: slezabaklana@gmail.com

**Гребінь Олександр Павлович (Гребінь Александр Павлович, Grebin Alexander Pavlovych)** – старший викладач кафедри звукотехніки та реєстрації інформації, старший викладач, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, м. Київ; тел.: (+38044) 204-80-80; e-mail: alexgstudio.2016@gmail.com

**Швайченко Володимир Борисович (Швайченко Владимир Борисович, Shvaichenko Volodymyr Voruyovych)** – доцент кафедри звукотехніки та реєстрації інформації, канд. техн. наук, доцент, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, м. Київ; тел.: (+38044) 204-80-80; e-mail: vbs2011@ukr.net.

УДК 621.314

**В.М. БАКІКО, П.В. ПОПОВИЧ, В.Б. ШВАЙЧЕНКО****ВИЗНАЧЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ЗА ВИПАДКОВОГО ВПЛИВУ ЗАВАД**

Досліджено вплив багатопроменевого поширення радіохвиль на передавання звукового контенту через канали з нормальним та логнормальним розподілом завад з використанням безпроводових технологій GSM та WiMAX. Вибір технологій обумовлено тим, що в GSM відсутній обов'язковий механізм захисту від інтерференції, спричиненої багатопроменевим поширенням, тоді як фізичний рівень WiMAX реалізовано із застосуванням технології OFDM, яка призначена для боротьби з цим ефектом. Для дослідження в програмному середовищі MATLAB Simulink побудовано відповідні моделі приймально-передавальних трактів з використанням елементів бібліотеки Communication System Toolbox.

**Ключові слова:** безпроводові канали зв'язку, електромагнітна сумісність, закони розподілу, імітаційне моделювання, радіозавади.

**В.Н. БАКИКО, П.В. ПОПОВИЧ, В.Б. ШВАЙЧЕНКО****ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КОММУНИКАЦИОННОГО КАНАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЛУЧАЙНЫХ ПОМЕХ**

Исследовано влияние многолучевого распространения радиоволн на передачу звукового контента через каналы с нормальным и логнормальное распределение помех с использованием беспроводных технологий GSM и WiMAX. Выбор технологий обусловлен тем, что в GSM отсутствует обязательный механизм защиты от интерференции, вызванной многолучевым распространением, тогда как физический уровень WiMAX реализован с применением технологии OFDM, которая предназначена для борьбы с этим эффектом. Для исследования в программной среде MATLAB Simulink построены соответствующие модели приемно-передающих трактов с использованием элементов библиотеки Communication System Toolbox.

**Ключевые слова:** беспроводные каналы связи, законы распределения, имитационное моделирование, радиопомехи, электромагнитная совместимость.

**V.N. BAKIKO, P.V. POPOVYCH, V.B. SHVAICHENKO****ESTIMATION OF NOISE IMMUNITY OF THE COMMUNICATION CHANNEL UNDER THE INFLUENCE OF RANDOM INTERFERENCE**

The influence of multibeam propagation of radio waves on the transmission of audio content through channels with normal and log-normal distributions of disturbances using wireless technologies of GSM and WiMAX has been investigated. The choice of technology is due to the fact that the GSM does not have the required protection mechanism from the interference caused by multi-beam propagation, while the physical level of WiMAX is realized using OFDM technology, which is designed to combat this effect. For research in the MATLAB Simulink software environment, appropriate models of transceiver paths are constructed using elements of the Communication System Toolbox library.

**Keywords:** distribution laws, electromagnetic compatibility, radiofrequency interference, simulation, wireless communication channels.

**Вступ.** В сучасних звукотехнічних систем (ЗТС) суттєвою є проблема електромагнітної сумісності (ЕМС) [1]. Особливості проблеми ЕМС, обумовлені ключовими режимами роботи напівпровідникових перетворювачів [2], в структурі аудіовізуальних систем поглиблюються в разі застосування безпроводового каналу. Сучасні мультимедійні системи використовують елементи штучного інтелекту, безпроводові канали передачі даних і підключення до інтернету, реалізуючи технологію інтернету речей (IoT). При цьому для підвищення енергоефективності крім застосування спеціальних режимів роботи електронних систем, орієнтованих на тимчасове зменшення енергоспоживання, застосовують напівпровідникові перетворювачі з підвищеним ККД [2]. Схемотехніка таких перетворювачів визначається багатьма факторами, наприклад, перетворюється потужністю, вимогам до масо-габаритними показниками і багатьма іншими. Ці

пристрої працюють в ключовому режимі на високих частотах. Рівні завад цих перетворювачів нормовані для забезпечення електромагнітної сумісності [3], проте реальна електромагнітна обстановка може бути недружною і навіть невеликий допустимий внесок в сумарне електромагнітне поле на конкретних частотах може привести до погіршення якості переданого звукового фрагмента.

Необхідно відзначити, що навіть при дозволеному рівні емісії завад кондуктивними шляхами в провідниках таких пристроїв можуть виникати стрибки струму, що призводять до появи завад випромінювання в ближньому полі, причому відомі методики перевірки пристроїв на вимоги електромагнітної сумісності проводять на відстані 3м або 10 м від вимірювальної антени [3], а в реальних умовах ця антена може перебувати на тій же платі, де і розташовані елементи підсилювача потужності або джерела вторинного еле-

ктроживлення. Інтеграція досягнень в області інфо-комунікаційних технологій в побутову техніку забезпечило появу Інтернету речей та впровадження голосових віртуальних сервісів управління, розроблених провідними виробниками обчислювальної техніки, наприклад, Siri, Google Now, Google Assistant, Amazon Echo, Microsoft Cortana [4].

Застосування таких сервісів в інтелектуальних аудіовізуальних системах, як smart-телевізори, smart-колонки, виявили проблему впливу завад на передаваний безпроводовим шляхом аудіоконтент. Найбільш поширеними каналами передачі для таких пристроїв в даний час є канали технологій WiFi, WiMAX і GSM [5] проте напрямком на інтеграцію в рамках технологій LTE дозволяє припустити можливість і необхідність не тільки вибору найменш зашумленого каналу з нормованого пулу частот для конкретної технології, а й перехід для поліпшення якості відтвореного звуку на інший частотний діапазон і зміну способу кодування і модуляції, застосувавши найбільш перспективну за критерієм EMC безпроводову технологію.

Для дослідження впливу завади з різним законом розподілу на передавання звукового контенту з використанням безпроводових технологій GSM, WiMAX та Wi-Fi в сучасних мультимедійних smart-системах, таких як гучномовці та телевізори, в програмному середовищі MATLAB Simulink побудовано відповідні моделі приймально-передавальних трактів з використанням елементів бібліотеки Communication System Toolbox [6]. Для моделювання використано музичну композицію *Hard As A Rock* в стерео форматі, збережену у вигляді mp3 файлу [7], що є одним із найбільш поширених сценаріїв передавання звукової інформації через безпроводові канали зв'язку. Визначення уражених ЗТС заздалегідь дозволить відомими засобами [8-10] покращити EMC.

**Мета** даної роботи – визначення моніторингу значень імпедансу електромережі змінного струму для налаштування параметрів ПЗФ таким чином, щоб досягнути збільшення вношуваного загасання в області НЧ в реальному часі.

**Основна частина.** Для введення даних із звукового файлу в середовище Simulink використано блок для підключення зовнішніх мультимедійних файлів *From Multimedia File*. Оскільки аудіо файл з двома стерео каналами має формат даних двовимірної матриці, то для її перетворення в одновимірну матрицю застосовано відповідне узгодження, як наведено на рис. 1.

Часову діаграму фрагменту звукової композиції та спектр тестового сигналу наведено на рис. 2, а та 2, б відповідно.

Для дослідження передавання звукового контенту за технологією WiMAX використано модель фізичного каналу системи WiMAX «IEEE 802.16-2004 WirelessMAN-OFDM PHY Downlink». Модель доповнено блоком *From Multimedia File*, а також блоками, що узгоджують формати даних між вузлами моделі і приладами моніторингу для фіксації часових та час-

отних залежностей. В приймальному тракті застосовано алгоритм адаптивного контролю швидкості передавання, який дозволяє автоматично, в залежності від відношення сигнал-шум, перемикає схему модуляції і кодування.

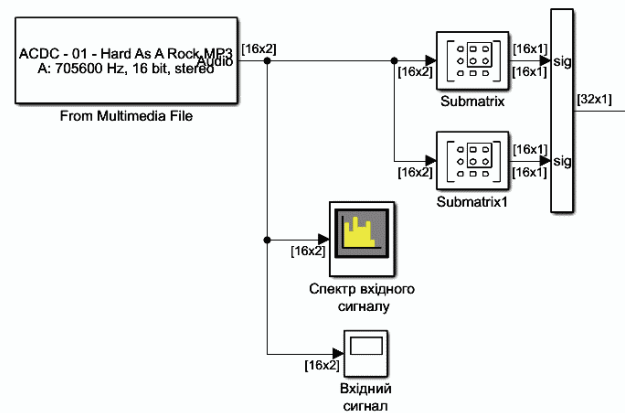


Рисунок 1 – Джерело звукових даних та блок узгодження розмірності

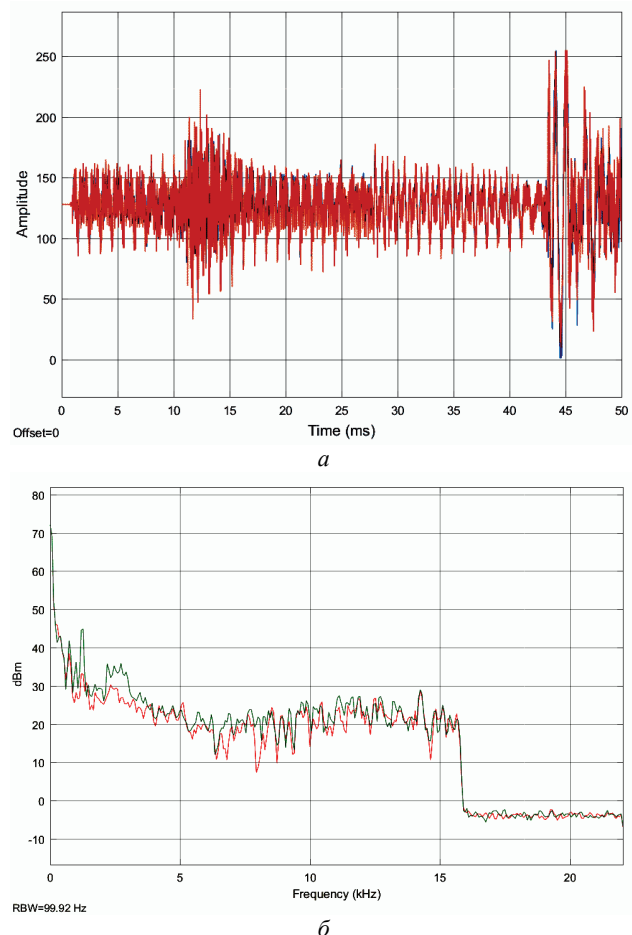


Рисунок 2 – Часова діаграма (а) та спектр (б) тестового сигналу

Моделю для дослідження впливу завад з різним законом розподілу на передавання звукового контенту з використанням технології GSM містить блок передавача, що складається з двох частин: блоку кодування



та блоку модуляції. Для формування пакетів довжиною 260 символів, які передають через канал GSM, застосовано блок узгодження, розташований на вході передавача.

Блок каналу передавання містить дві складові, кожна з яких додає шум із заданим законом розподілу: нормальним (AWGN) та логнормальним (LogNorm). Для дослідження впливу багатопроменевого поширення перед блоками AWGN та Log\_noise вмикають блок Rayleigh Fading, що імітує канал із завмираннями, розподіленими за законом Релея. Блок приймача містить блоки демодуляції та декодування.

Використовуючи зазначені моделі приймально-передавальних трактів GSM та WiMAX, отримано залежності величини BER від відношення сигнал-шум (SNR) для нормального (AWGN) та логнормального (LogNorm) законів розподілу завад в каналі без урахування та з урахуванням завмирань, спричинених багатопроменевим характером поширення радіохвиль, які наведено на рис. 3 та на рис. 4.

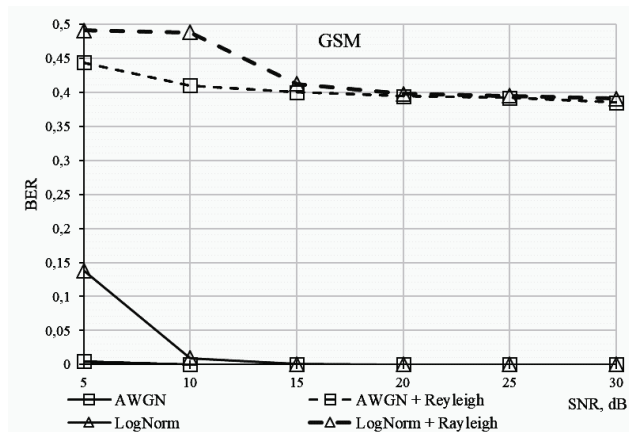


Рисунок 3 – Залежність величини BER від відношення SNR для різних законів розподілу завад в каналі системи GSM без урахування та з урахуванням завмирань

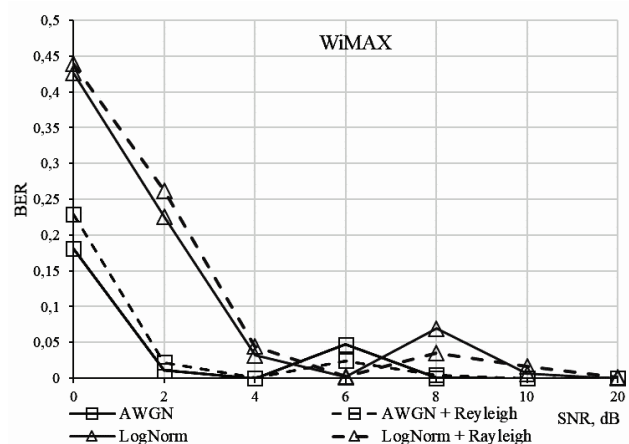


Рисунок 4 – Залежність величини BER від відношення SNR для різних законів розподілу завад в каналі системи WiMAX без урахування та з урахуванням завмирань

На рис. 5 наведено приклад спектру переданої музичної композиції через канал системи GSM для різних законів розподілу завад у випадку  $SNR = 8$  дБ, що відповідає значенню  $BER = 1,3 \cdot 10^{-4}$  для каналу з

нормальним розподілом та значенню  $BER=0,027$  для каналу з логнормальним розподілом.

Під час моделювання прийнято такі параметри нормального та логнормального законів розподілу завад:  $\mu = 0$  та  $\sigma^2 = 1$ .

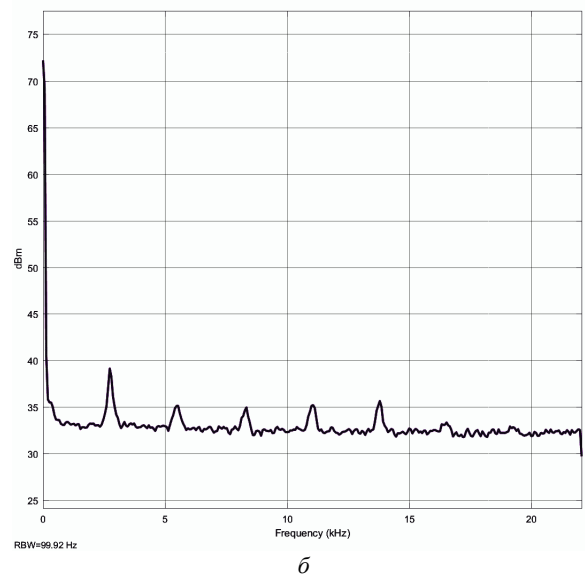
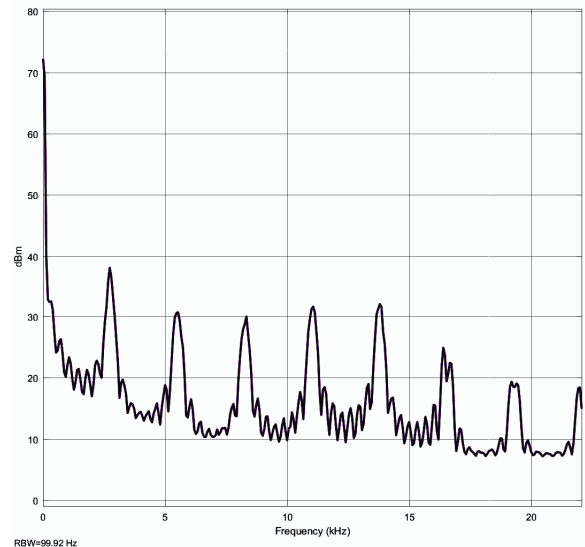


Рисунок 5 – Спектр переданої музичної композиції через канал GSM ( $SNR = 8$  дБ):  
 а – з нормальним розподілом ( $BER=1,3 \cdot 10^{-4}$ );  
 б – з логнормальним розподілом ( $BER=0,027$ )

Для закону розподілу Релея прийнято такі параметри: максимальне значення доплерівського зсуву 80 Гц для технології GSM та 110 Гц для технології WiMAX, що відповідає швидкості переміщення абонентської станції 50 км/год (середня швидкість руху автомобіля в місті); вектор значень затримок багатопроменевих компонент  $[0; 0,4; 0,9]$  мкс; вектор значень потужності прямої та затриманих багатопроменевих компонент  $[0; -15; -20]$  дБ. Профіль затримок є типовим для міської забудови. Окремо під час моделювання каналу передавання WiMAX застосовано коефіцієнт  $K=0$ , який трансформує закон розподілу

Райса, в якому домінує складова поширення вздовж лінії прямої видимості, в закон розподілу Релея з домінуючими затриманими компонентами багатопроменевого сигналу, коли пряма видимість між передавачем і приймачем відсутня.

**Висновки.** Таким чином, за результатами моделювання можна зазначити, що:

1. Найбільший рівень помилок спостерігається в каналі з логнормальним розподілом завад, а найменший – в каналі з нормальним розподілом завад.

2. Більш стійкими до впливу завад, в тому числі спричинених завмираннями внаслідок багатопроменевого поширення радіохвиль, є системи з ортогональним частотним мультиплексуванням OFDM такі, як WiMAX, Wi-Fi чи LTE.

3. Для підвищення стійкості до комбінованих завад в каналі GSM рекомендовано застосовувати еквалайзинг, що базується на використанні спеціальних адаптивних фільтрів, які частково компенсують вплив затриманих компонент прийнятого багатопроменевого сигналу.

4. Модель приймально-передавального тракту системи WiMAX працює некоректно під час адаптивного перемикання схем модуляції за низьких значень SNR (6-8 дБ).

#### Список літератури:

1. *Бакико В.М.* Особливості електромагнітної сумісності в звукотехнічних телекомунікаційних системах / *В.М. Бакико, О. Шарадга* // IV Міжнародна наук.-техн. конф. молодих вчених «Електроніка 2011». Частина 2: Зб. статей. – К.: 2011. – С. 236-244.
2. *Векслер Г.С.* Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания / *Г.С. Векслер* и др. – К.: Техніка, 1990. – 167 с.
3. CISPR 22 Edition 6.0 2008-09 IEC STANDARDS. Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement.
4. *Зеньков А.* 10 виртуальных ассистентов: обзор / *А. Зеньков*. – Режим доступу: <https://rb.ru/list/from-siri-to-ozlo> Дата доступу 14.02.2018.
5. *Денбновецький С.В.* Кодування сигналів в електронних системах. Ч.1. Параметри сигналів і каналів зв'язку та методи їх оцінювання / *С.В. Денбновецький, І.В. Мельник, Л.Д. Писаренко*. – К.: Кафедра, 2016. – 524 с.
6. *Дьяконов В. П.* Matlab и Simulink для радиоинженеров / *В.П. Дьяконов*. – М.: ДМК-Пресс, 2011. – 976 с.
7. *Никамин В.А.* Цифровая звукозапись. Технологии и стандарты. / *В.А. Никамин*. – СПб.: НИТ, 2002. – 256 с.
8. *Nave M.J.* Power Line Filter Design for Switched Mode Power Supplies / *Mark J. Nave*. 2nd Edition Hardcover. – 2010.

– 186 p.

9. *Кечиев Л.Н.* ЭМС и информационная безопасность в системах телекоммуникации / *Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов*. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. – 320 с.

10. *Пілінський В.В.* Особливості мікропроцесорного керування параметрами дроселя протизавадового фільтра для керування характеристиками загасання в смузі частот 3...5 декад / *В.В. Пілінський, С.М. Веретюк, А.О. Довженко, В.Б. Швайченко* // Електроніка і зв'язь. Тем. вип. «Електроніка і нанотехнології». – 2011. – № 4. – С. 182-187.

#### References (transliterated):

1. Bakiko V.N., Sharadjah O. Features of electromagnetic compatibility of audio parts of telecommunication systems. IV Mignarodna konferencija molodyh vchenyh [IV International science-technical of jung scientist «Electronics 2011» Part 2. Kyiv: 2011. P. 236-244 (Russian).
2. Veksler G.S. et al. Podavlenije elektromagnitnyh pomeh v cepjah elektropitanija [Suppression of electromagnetic interferences on power supplies]. Kyiv: Technika, 1990. 167 p. (Russian).
3. CISPR 22 Edition 6.0 2008-09 IEC STANDARDS. Information technology equipment – Radio disturbance characteristics. Limits and methods of measurement.
4. Zenkov A. 10 virtualnyh assistentov: obzor [10 virtual assistants: an overview] Available form: <http://rb.ru/list/from-siri-to-ozlo>, dated as 2018-02-02). (Russian).
5. Denbnovetsky S.V., Melnyk I.V., Pysarenko L.D. Koduvannya syhnaliv v elektronnykh systemakh. CH.1. Parametry syhnaliv i kanaliv zv'yazku ta metody yikh otsynuvannya [Signal coding in electronic systems. Part 1 Parameters of signals and channels of communication and methods of their evaluation]. Kyiv: Kafedra, 2016. 524 p. (Ukrainian)
6. Dyakonov V.P. Matlab i Simulink dlja radioinzhenеров [Matlab and Simulink for radio engineers]. Moscow: DMK-Press, 2011. 976 p. (Russian).
7. Nikamin V.A. Tsifrovaja zvukozapis. Tekhnologii i standarty. [Digital sound recording. Technologies and standards]. St. Petersburg: NiT, 2002. 256 p. (Russian).
8. Nave M.J. Power Line Filter Design for Switched Mode Power Supplies, 2nd Edition Hardcover. 2010. 186 p.
9. Kechiev L.N., Stepanov P.V. EMS i informacionnaja bezopasnost' v sistemah telekommunikacij [EMC and information safety in telecommunication systems]. Moskow: Izdatelskij dom Tehnologiji, 2005. 320 p. (Russian).
10. Pilinskij V.V., Veretjuk S.M., Dovgenko A.O., Shvaichenko V.B. Osoblivosti mikroprocesornogo keruvannya parametrami drosselja protyzavodovogo fil'tra dlja keruvannya harakteristikami zagasanja v smuzi chastot 3-5 dekad.[Features of microprocessor control of RFI-filter choke parameters in frequency range 0f 3-5 decade] Elektronika i svjaz Tematichnyj vypusk Elektronika i nanotekhnologii [Electronics and telecommunication. Special issue Electronics and nanotechnology]. No. 4. 2011. P.182–185. (Ukrainian).

Надійшла (received) 02.03.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Бакико Вадим Миколайович (Бакико Вадим Николаевич, Bakiko Vadym Nikolaevich)** – асистент кафедри звукотехніки та реєстрації інформації, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, м. Київ; тел.: (+38044) 204-80-80; e-mail: slezabaklana@gmail.com.

**Попович Павло Васильович (Попович Павел Васильевич, Popovych Pavlo Vasyliovych)** – доцент кафедри звукотехніки та реєстрації інформації, канд. техн. наук, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, м. Київ; тел.: (+38044) 204-93-54; e-mail: prv\_ua@ukr.net.

**Швайченко Володимир Борисович (Швайченко Владимир Борисович, Shvaichenko Volodymyr Vorysovych)** – доцент кафедри звукотехніки та реєстрації інформації, канд. техн. наук, доцент, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, м. Київ; тел.: (+38044) 204-80-80; e-mail: vbs2011@ukr.net.

**М.И. БАРАНОВ****РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОЗОВОГО ОБЛАКА ТРОПОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

Приведены результаты приближенного определения для упрощенной расчетной модели грозового облака сферической формы заданным внешним радиусом  $R_0$  электрической энергии  $W_0$ , запасаемой в его объеме  $V_0$  с мелкодисперсными заряженными включениями, и амплитуды  $I_{mL}$  импульсного разрядного тока в системе «грозовое облако-земля». Принятая расчетная модель грозового облака базируется на электризации в теплых восходящих воздушных потоках мелких твердых диэлектрических частиц радиусом  $r_0$  и объемной плотностью  $N_0$ , поступающих в атмосферу с поверхности земли и с дымовыми выбросами промышленных предприятий. Показано, что в исследуемой модели грозового облака при  $R_0 \approx 985$  м ( $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>) электрический потенциал его наружной поверхности может достигать  $\varphi_0 \approx 506$  МВ, запасаемая электрическая энергия  $W_0 \approx 14,1$  ГДж, а амплитуда аperiodического импульса тока в плазменном канале длинного воздушного искрового разряда на землю  $I_{mL} \approx 272,9$  кА.

**Ключевые слова:** тропосфера Земли, грозовое облако, электрическая энергия облака, сила тока при разряде грозового облака на землю.

**М.І. БАРАНОВ****РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ОСНОВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОЗОВОЇ ХМАРИ ТРОПОСФЕРИ ЗЕМЛІ**

Приведені результати наближеного визначення для спрощеної розрахункової моделі грозової хмари сферичної форми заданим зовнішнім радіусом  $R_0$  електричної енергії  $W_0$ , що запасється в його об'ємі  $V_0$  з дрібнодисперсними зарядженими включеннями, і амплітуди  $I_{mL}$  імпульсного розрядного струму в системі «грозова хмара-земля». Прийнята розрахункова модель грозової хмари базується на електризації в теплих висхідних повітряних потоках дрібних твердих діелектричних частинок радіусом  $r_0$  і об'ємною щільністю  $N_0$ , що поступають в атмосферу з поверхні землі і з димовими викидами промислових підприємств. Показано, що в досліджуваній моделі грозової хмари при  $R_0 \approx 985$  м ( $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>) електричний потенціал його зовнішньої поверхні може досягати  $\varphi_0 \approx 506$  МВ, електрична енергія  $W_0 \approx 14,1$  ГДж, що запасється, а амплітуда аperiodичного імпульсу струму в плазмовому каналі довгого повітряного іскрового розряду на землю  $I_{mL} \approx 272,9$  кА.

**Ключові слова:** тропосфера Землі, грозова хмара, електрична енергія хмари, сила струму при розряді грозової хмари на землю.

**M.I. BARANOV****CALCULATION ESTIMATION OF BASIC POWER DESCRIPTIONS OF A STORM CLOUD OF TROPOSPHERE OF EARTH**

The results of close determination are resulted for the simplified calculation model of a storm cloud of spherical form by the set external radius of  $R_0$  of electric energy of  $W_0$ , stocked in his volume of  $V_0$  with the shallow dispersible charged including, and amplitude of  $I_{mL}$  of impulsive bit current in the system a «storm cloud-earth». The accepted calculation model of a storm cloud is based on electrization in the warm ascending currents of air of shallow particulate dielectric matters the radius of  $r_0$  and by a volume closeness of  $N_0$ , entering atmosphere from a terrene and with the smoke extras of industrial enterprises. It is rotined that in the probed model of a storm cloud at  $R_0 \approx 985$  m ( $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>) electric potential of his outward surface can arrive at  $\varphi_0 \approx 506$  MV, stocked electric energy of  $W_0 \approx 14,1$  GJ, and amplitude of aperiodic impulse of current in the plasma channel of a long air spark digit on earth of  $I_{mL} \approx 272,9$  kA.

**Key words:** troposphere of Earth, storm cloud, electric energy of cloud, strength of current at the discharge of a storm cloud on earth.

**Введение.** Несмотря на достаточно высокий уровень развития в настоящее время электрофизических основ техники высоких напряжений, до сих пор одной из проблемных задач в области атмосферного электричества остается та, которая связана с определением основных энергетических характеристик грозового облака тропосферы Земли [1]. К таким характеристикам следует отнести электрическую энергию  $W_0$ , запасаемую подобным атмосферным облаком в скоплении внутри себя заряженных мелкодисперсных включений (сферических капель и паров воды, мелких кристаллов

льда и твердых диэлектрических частиц), и импульсный электрический ток  $i_L$  его длинного искрового разряда в объекты, находящиеся на земной поверхности. Заметим, что под грозовым облаком специалисты-метеорологи понимают кучево-дождевое облако, для которого выполняется ряд критических условий, сформулированных в [1]. Что касается понятия тропосферы Земли, то под ним понимают нижнюю часть земной атмосферы высотой до 11 км в умеренных широтах, в которой содержится 4/5 всей массы атмосферы, почти весь водяной пар и развиваются облака

[1,2]. Знание указанных энергетических характеристик грозового облака позволяет хоть как-то прогнозировать грозовую обстановку в том или ином районе нашей планеты, а также расширяет знания людей в области атмосферного электричества и физики длинного воздушного искрового разряда – молнии. В этой связи практическая апробация приближенных расчетных соотношений для определения величин  $W_0$  и  $i_L$  применительно к грозовому облаку той или иной геометрической формы и внутренней «начинки» является актуальной прикладной научно-технической задачей.

**Целью статьи** является выполнение на основании известных в технике и электрофизике высоких напряжений и больших токов аналитических зависимостей расчетной оценки запасаемой в грозовом облаке упрощенной структуры и конфигурации электрической энергии и канального тока при его длинном воздушном искровом разряде в земную плоскую поверхность.

**1. Постановка задачи.** Рассмотрим тот частный случай, когда грозовое облако имеет форму сплошной сферы радиусом  $R_0 \approx 985$  м (рис. 1), внутри которой с усредненной объемной плотностью  $N_0 \approx 5 \cdot 10^7$  м<sup>-3</sup> размещены главным образом твердые диэлектрические частицы радиусом  $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$  м [1], каждая из которых на стадии формирования кучево-дождевого облака получила за счет электризации в теплых восходящих воздушных потоках земной атмосферы отрицательный электрический заряд величиной  $q_0 \approx 2,78 \cdot 10^{-16}$  Кл и на стадии формирования грозового облака освободилась от покрывающих их электронейтральных молекулярных диполей воды [3]. Выбор указанного численного значения радиуса  $R_0$  облака был обусловлен тем, что для упрощения расчетов его исходный расчетный объем  $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> представлял собой прямоугольную призму с размерами в горизонтальном основании 1000 м x 1000 м и высотой 4000 м, центр которой был расположен на высоте  $H_0 \approx 3000$  м над плоской поверхностью земли (см. рис. 1). Согласно [1] именно с таких высот и начинается в тропосфере образование облачных зарядов. Исходя из того, что в принятом приближении  $V_0 = 4\pi R_0^3/3 = 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> и вытекает указанное численное значение  $R_0$ . Что касается численных значений величин  $N_0$  и  $r_0$ , то они были выбраны на основании экспериментальных данных, приведенных в [1]. Расчетное определение в облаке указанного численного значения заряда  $q_0 \approx 2,78 \cdot 10^{-16}$  Кл твердых диэлектрических частиц радиусом  $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$  м было выполнено в [3] с учетом теории двойного электрического слоя, основы которой приведены в [1,4]. Отдельные заряды  $q_0$  плотностью  $N_0$  определяют в рассматриваемом случае их усредненную объемную плотность  $\sigma_V \approx q_0 N_0 \approx 1,39 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup>, распределенную по сфере грозового облака. Пусть в воздушном промежутке системы «грозовое облако-земля» выполняются нормальные атмосферные условия (давление воздуха составляет около  $1,013 \cdot 10^5$  Па, а его температура равна 0 °С [4].

Требуется с учетом принятых допущений в при-

ближенном виде расчетным путем определить искомые значения накопленной принятым грозовым облаком электрической энергии  $W_0$  и амплитуды  $I_{mL}$  импульсного разрядного тока в системе «грозовое облако-земля».

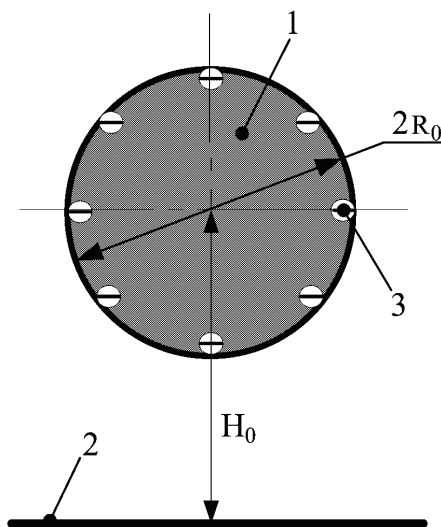


Рисунок 1 – Упрощенный вид отрицательно заряженного грозового облака сферической формы, размещенного над земной поверхностью:

1 – облако; 2 – поверхность земли; 3 – электрон

**2. Расчетная оценка электрической энергии  $W_0$ , запасенной в грозовом облаке.** Данную расчетную оценку величины  $W_0$  выполним первоначально на основании классического подхода (вариант расчета № 1), использующего следующее известное в электротехнике и электрофизике аналитическое соотношение [4]:

$$W_0 = 0,5 C_0 U_0^2, \quad (1)$$

где  $C_0$  – электрическая емкость в системе «грозовое облако-земля»;  $U_0$  – разность электрических потенциалов грозового облака и плоской поверхности земли.

С учетом того, что в рассматриваемом случае количественно выполняется равенство вида  $H_0/R_0 \approx 3,04$  (как видим, численно больше 1,5), то для нахождения величины  $C_0$  может быть использовано следующее известное в электростатике расчетное соотношение [5]:

$$C_0 = 2\pi\epsilon_0 / \ln(2H_0 / R_0), \quad (2)$$

где  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная [4].

Так как электрический потенциал  $\varphi_E$  поверхности земли в исследуемом случае в первом приближении можно принять равным нулю, то для определения в (1) величины  $U_0$  требуется найти лишь значение электрического потенциала  $\varphi_0$  наружной сферической поверхности исследуемого атмосферного облака. Для этого предварительно найдем суммарный электрический заряд  $q_{\Sigma 0}$ , находящийся в сферической области радиусом  $R_0$ , занимаемой принятым грозовым облаком, в виде  $q_{\Sigma 0} \approx \sigma_V V_0 \approx 55,6$  Кл. Тогда для искомого электрического потенциала  $\varphi_0$  на наружной поверхности сферы грозового облака (при ее текущем радиусе  $r = R_0$ ), внутри которой равномерно по объему распре-

делены заряды  $q_0$  твердых диэлектрических частиц радиусом  $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$  м, можно записать следующее расчетное выражение [6]:

$$\varphi_0 = q_{\Sigma 0} / (4\pi\epsilon_0 R_0). \quad (3)$$

Из (3) при  $q_{\Sigma 0} \approx 55,6$  Кл и  $R_0 \approx 985$  м получаем, что на внешней границе принятой расчетной модели грозового облака электрический потенциал принимает численное значение, равное около  $\varphi_0 \approx 506$  МВ. В этой связи величина  $U_0$  при используемых допущениях оказывается также численно равной примерно 506 МВ. С учетом (2) при  $H_0 \approx 3000$  м и  $R_0 \approx 985$  м для емкости в системе «грозовое облако-земля» следует, что  $C_0 \approx 30,8 \cdot 10^{-12}$  Ф. В результате из (1) при  $C_0 \approx 30,8 \cdot 10^{-12}$  Ф и  $U_0 \approx 506 \cdot 10^6$  В находим, что запасаемая электрическая энергия в заряженной сфере грозового облака будет численно составлять достаточно малое значение, равное всего около 3,94 МДж. Одной из причин тому является, на мой взгляд, некорректное определение по (2) величины электрической емкости  $C_0$  для электрически заряженного по всему сферическому объему  $V_0$  грозового облака. Расчетная формула (2) учитывает только определенный незначительный по своей величине электрический заряд, распределенный лишь по наружной сферической поверхности принятого нами грозового облака. Отсюда, видимо, и появляется значительная погрешность в нахождении величины  $W_0$  по приведенному выше варианту расчета №1, не учитывающему объемный характер суммарного заряда  $q_{\Sigma 0}$  исследуемого атмосферного облака.

Далее при оценке величины  $W_0$  остановимся на варианте расчета № 2, в котором учитывается суммарный электрический заряд  $q_{\Sigma 0}$  рассматриваемого грозового облака. Для этого в (1) под величиной емкости  $C_0$  рассматриваемой системы «грозовое облако-земля» будем понимать эквивалентную электрическую емкость  $C_{0E}$  заряженной по всему объему сферы грозового облака, которую следует определять из выражения вида [5]:

$$C_{0E} = q_{\Sigma 0} / U_0. \quad (4)$$

Из (4) при  $q_{\Sigma 0} \approx 55,6$  Кл и  $U_0 \approx 506 \cdot 10^6$  В получаем, что в этом случае искомая величина эквивалентной емкости  $C_{0E}$  принимает численное значение, равное примерно  $1,1 \cdot 10^{-7}$  Ф. Тогда для величины  $W_0 = 0,5 C_{0E} U_0^2$  при  $C_{0E} \approx 110$  нФ и  $U_0 \approx 506$  МВ находим, что запасаемая в исследуемом упрощенном грозовом облаке электрическая энергия численно составляет около  $14,1 \cdot 10^9$  Дж.

Одной из возможных проверок достоверности приведенных выше расчетных данных (например, для численного значения  $U_0 \approx 506 \cdot 10^6$  В) может служить то, что величина напряженности  $E_R$  электрического поля вблизи наружной сферической поверхности рассматриваемого грозового облака, определенная из приближенного соотношения вида  $E_R \approx U_0 / R_0$  [4], при  $U_0 \approx 506$  МВ и  $R_0 \approx 985$  м будет численно равной примерно 513 кВ/м. В тоже время величина  $E_R$ , найденная из известного в электростатике более точного соотношения вида [6]

$$E_R = q_{\Sigma 0} / (4\pi\epsilon_0 R_0^2), \quad (5)$$

при  $q_{\Sigma 0} \approx 55,6$  Кл и  $R_0 \approx 985$  м оказывается равной около 515 кВ/м. Видно, что оба приведенные количественные результаты для  $E_R$  практически совпадают. Кроме того, найденное расчетным путем численное значение суммарного электрического заряда  $q_{\Sigma 0} \approx 55,6$  Кл в исследуемом грозовом облаке соответствует нормированному значению заряда  $q_L = (50 \pm 10)$  Кл для короткого удара молнии с разрядным аперийодическим током временной формы 10 мкс/350 мкс в наземные объекты, удовлетворяющие III-IV уровням молниезащиты по требованиям международного стандарта IEC 62305-1: 2010 [7,8].

**3. Расчетная оценка амплитуды тока  $I_{mL}$  в канале разряда грозового облака на поверхность земли.** Предварительно оценим численное значение индуктивности  $L_k$  цилиндрического плазменного канала радиусом  $r_k$  искрового разряда грозового облака в воздушном промежутке длиной  $l_k \approx (H_0 - R_0)$  на землю по следующей известной в электрофизике формуле [9]:

$$L_k = (2\pi)^{-1} \mu_0 l_k [\ln(2l_k / r_k) - 1], \quad (6)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная [4].

Из (6) при  $l_k \approx (H_0 - R_0) \approx 2015$  м и  $r_k \approx 10 \cdot 10^{-3}$  м [10] вытекает, что в рассматриваемом случае сосредоточенная индуктивность  $L_k$  канала искрового разряда будет принимать численное значение, равное примерно 4,79 мГн. При определении активного сопротивления  $R_k$  плазменного канала грозового воздушного разряда будем исходить из того, что погонное активное сопротивление  $R_{k0}$  исследуемого сильноточного канала согласно расчетно-экспериментальным данным из [10] для повторной импульсной D-компоненты тока искусственной молнии амплитудой  $I_{mD} \approx -92,3$  кА (рис. 2, где  $t_{mD} \approx 15$  мкс – время, соответствующее первой амплитуде  $I_{mD}$  тока) численно составляет около 0,92 Ом/м. Тогда для активного сопротивления  $R_k$  плазменного канала длинного искрового разряда рассматриваемого грозового облака в землю находим, что  $R_k \approx R_{k0} l_k \approx 0,92$  Ом·м<sup>-1</sup> × 2015 м ≈ 1,85 кОм. Из полученных численных результатов для параметров  $R_k$ ,  $L_k$  и  $C_{0E}$  следует, что  $R_k > 2(L_k / C_{0E})^{1/2}$  [4, 9].

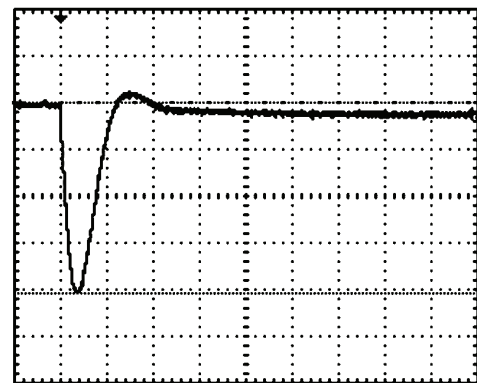


Рисунок 2 – Типичная оциллограмма D-компоненты тока искусственной молнии ( $I_{mD} \approx -92,3$  кА;  $t_{mD} \approx 15$  мкс; масштаб по вертикали – 22,52 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка), полученная в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора тока молнии типа УИТОМ-1 [10]

С учетом выполнения в сильноточной цепи длинного воздушного разряда на землю исследуемого грозового облака указанного соотношения для ее параметров  $R_k$ ,  $L_k$  и  $C_{0E}$  в плазменном канале воздушного искрового разряда будет протекать аperiodический импульс тока молнии длительностью  $\tau_p$  примерно 142,4 мкс на уровне  $0,5I_{mL}$  ( $\tau_p \approx 0,7R_kC_{0E}$ ). В этой связи искомую величину амплитуды  $I_{mL}$  импульсного разряда тока в системе «грозовое облако-земля» определяем из соотношения:

$$I_{mL} \approx U_0 / R_k. \quad (7)$$

Из (7) при  $U_0 \approx 506$  МВ и  $R_k \approx 1,85$  кОм находим, что для выбранной расчетной модели грозового облака численное значение амплитуды  $I_{mL}$  тока в канале молнии составляет около 272,9 кА. Полученное нами количественное значение  $I_{mL}$  хорошо коррелирует с максимальными значениями импульсного тока, характерными для коротких ударов молнии в наземные объекты [7,8].

### Выводы.

1. На примере упрощенной расчетной модели грозового облака сферической формы наружным радиусом  $R_0 \approx 985$  м и объемом  $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>, базирующейся на распределении с усредненной плотностью  $N_0 \approx 5 \cdot 10^7$  м<sup>-3</sup> по объему облака отрицательно наэлектризованных в теплых восходящих воздушных потоках твердых диэлектрических частиц радиусом  $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$  м и зарядом  $q_0 \approx 2,78 \cdot 10^{-16}$  Кл, предложены приближенные соотношения для количественной оценки электрической энергии  $W_0$ , запасаемой в таком грозовом облаке, и наибольшей амплитуды  $I_{mL}$  импульсного тока в сильноточном плазменном канале длинного воздушного искрового разряда этого атмосферного облака на землю. Несмотря на принятые упрощения при выборе указанной расчетной модели грозового облака, представленный подход с использованием в составе облака лишь заряженных за счет электризации в воздушной атмосфере мелких сферических диэлектрических частиц и электронейтральных молекулярных диполей воды носит достаточно обобщенный характер и отражает основные электрофизические процессы и механизмы, протекающие в подобных облаках земной тропосферы при формировании ими предгрозовой и грозовой обстановок в различных регионах нашей планеты.

2. Полученные результаты будут способствовать возможному выполнению отечественными электрофизиками и метеорологами лишь по визуально определяемому в приближенном виде ими внешним (габаритным) размерам грозового облака (только по занимаемому этим облаком ориентировочному объему  $V_0$ ) прогнозных количественных оценок для таких энергетических характеристик наблюдаемого ими грозового облака как запасаемая в нем электрическая энергия  $W_0$  и наибольшая сила импульсного тока  $I_{mL}$  при его длинном воздушном искровом сильноточном разряде в объекты, размещенные на поверхности земли.

3. Учитывая определенную простоту научно-технического изложения автором достаточно сложно-

го материала электрофизической направленности, связанного с физикой возникновения и формирования в земной тропосфере грозового облака и его дальнейшим поражающим (разрушающим) электротермическим и электродинамическим воздействием на наземные объекты и окружающую их среду, приведенные данные позволяют инженерно-техническому персоналу электроэнергетического профиля на ответственных технических объектах самостоятельно осуществлять оценку возможной угрозы для их объектов сформировавшегося в зоне их размещения того или иного грозового облака.

### Список литературы:

1. Бортник И.М. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учебник для ВУЗов / И.М. Бортник, А.А. Белогловский, И.П. Вережцагин, Ю.Н. Вершинин, А.В. Калинин, Г.С. Кучинский, В.П. Ларионов, А.Е. Монастырский, А.В. Орлов, А.Г. Темников, Ю.С. Пинталь, Ю.Г. Сергеев, М.В. Соколова. – Под общей ред. проф. И.П. Вережцагина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.
2. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
3. Баранов М.И. Новая гипотеза и электрофизическая природа дополнительных механизмов возникновения, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных облаках Земли / М.И. Баранов // Электротехника і електромеханіка. – 2018.– №1.– С. 46-53. – DOI: 10.20998/2074-272X.2018.1.07.
4. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / В.Е. Кузьмичев. – Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
5. Иосель Ю.Я. Расчет электрической емкости / Ю.Я. Иосель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с.
6. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
7. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning. Part 1: General principles. – Geneva: IEC Publ. 2010. pp. 1-72.
8. Baranov M.I. A generator aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10/350  $\mu$ s with an amplitude of  $\pm$  (100-200) kA / M.I. Baranov, G.M. Koliushko, V.I. Kravchenko, S.V. Rudakov // Instruments and Experimental Techniques. – 2015. – Vol. 58, No.6. – P. 745-750. – DOI: 10.1134/S0020441215060032.
9. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – Пер. с англ. Ф.А. Николаева, Ю.П. Свириденко. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
10. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Монография в 3-х томах. Том 3: Теория и практика электрофизических задач / М.И. Баранов. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.

### Bibliography (transliterated):

1. Bortnik I.M., Beloglovskiy A.A., Vereshchagin I.P., Verшинin Yu.N., Kalinin A.V., Kuchinskiy G.S., Larionov V.P., Monastyrskiy A.E., Orlov A.V., Temnikov A.G., Pinal' Yu.S., Sergeev Yu.G., Sokolova M.V. Elektrofizicheskie osnovy tekhniki vysokih napryazhenij: Uchebnik dlya VUZov. Pod obshchej red. prof. I.P. Vereshchagina [Electrophysics bases of technique of high voltage: Textbook for Institutes of higher / Under general ed. prof. I.P. Vereshchagin]. Moscow, Publishing house of MEI, 2010, 704 p.
2. Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russian dictionaries Publ., 2004, 957 p.
3. Baranov M.I. Novaja gipoteza i elektrofizicheskaya priroda

dopolnitel'nyh mehanizmov vznikoveniya, nakopleniya i razdeleniya elektricheskikh zaryadov v atmosferynykh oblakah Zemli [New hypothesis and electrophysics nature of additional mechanisms of origin, accumulation and division of electric charges in the atmospheric clouds of Earth]. *Elektrotehnika i elektromekhanika-Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.1, pp.46-53. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.1.07.

4. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskiy* [The laws and formulas of physics / Editor. Ed. V.K. Tartakovskiy]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1989, 864 p.

5. Iossel' Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunskiy M.G. *Raschet elektricheskoy emkosti* [Calculation of electric capacity]. Leningrad, Publ. Energoizdat, 1981, 288 p.

6. Jaworskiy B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Handbook of physics]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 624 p.

7. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning. Part 1: General principles. Geneva, IEC Publ. 2010, pp. 1–72.

8. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10/350  $\mu$ s with an amplitude of  $\pm$  (100-200) kA. *Pribory i Tehnika Eksperimenta-Instruments and Experimental Techniques*, 2015, Vol. 58, no.6, pp.745–750. DOI: 10.1134/S0020441215060032.

9. Knopfel H. *Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja / Per. s eng. Ph.A. Nikolaeva, Yu.P. Sviridenko* [Superstrong pulsed magnetic fields / Trans. from eng. Ph.A. Nikolaev, Yu.P. Sviridenko]. Moscow, Mir Publ., 1972, 391 p.

10. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki: Monografija v 3-h tomah. Tom 3: Teorija i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of electrophysics: Monograph in 3-th volumes. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Point Publ., 2014, 400 p.

Поступила (received) 12.03.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Баранов Михайло Іванович (Баранов Михаил Иванович, Baranov Michail Ivanovich)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту «Молнія» НТУ «ХП», м. Харків; тел.: (057) 707-68-41; e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua.

УДК 537.523

**Л.З. БОГУСЛАВСЬКИЙ, С.С. КОЗИРЄВ, Л.Є. ОВЧИННИКОВА, Ю.О. АДАМЧУК, С.В. ЧУЩАК**

#### УМОВИ ЗАПАЛЮВАННЯ ОБ'ЄМНОГО РОЗРЯДУ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРАЦІЇ ГАЗІВ

Досліджено вплив конструкції електродних систем та швидкості газового потоку на умови запалювання та підтримки стабільного об'ємного розряду в системах електрофільтрації газів. Встановлено, що для отримання об'ємного розряду, який займає весь міжелектродний об'єм, необхідне застосування електродної системи типу «щітка» з симетричним розташуванням осаджувальних електродів. Напруга запалювання й інтенсивного світіння такого розряду 55–60 кВ при частоті проходження імпульсів від 1 до 3 кГц. Для недопущення виникнення контракції мінімальна частота проходження імпульсів повинна бути пропорційна швидкості потоку газу і обернено пропорційна довжині каналу прокачування газу.

**Ключові слова:** об'ємний розряд, електродна система, електрофільтрація промислових газів, швидкість газового потоку, режими запалювання об'ємного розряду.

**Л.З. БОГУСЛАВСКИЙ, С.С. КОЗИРЕВ, Л.Е. ОВЧИННИКОВА, Ю.О. АДАМЧУК, С.В. ЧУЩАК**

#### УСЛОВИЯ ЗАЖИГАНИЯ ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАЦИИ ГАЗОВ

Исследовано влияние конструкции электродных систем и скорости газового потока на условия зажигания и поддержания стабильного объемного разряда в системах электрофильтрации газов. Установлено, что для получения объемного разряда, который занимает весь межэлектродный объем, необходимо применение электродной системы типа «щетка» с симметричным расположением осадительных электродов. Напряжение зажигания и интенсивного свечения такого разряда 55–60 кВ при частоте следования импульсов от 1 до 3 кГц. Для недопущения возникновения контракции минимальная частота следования импульсов должна быть пропорциональна скорости потока газа и обратно пропорциональна длине канала прокачки газа.

**Ключевые слова:** объемный разряд, электродная система, электрофильтрация промышленных газов, скорость газового потока, режимы зажигания объемного разряда.

© Л.З. Богуславський, С.С. Козирєв, Л.Є. Овчиннікова, Ю.О. Адамчук, С.В. Чушак, 2018

**L.Z. BOHUSLAVSKYI, S.S. KOZYREV, L.E. OVCHYNNIKOVA, Y.O. ADAMCHUK, S.V. CHUSHCHAK**

## CONDITIONS FOR IGNITION OF THE VOLUME DISCHARGE IN THE SYSTEMS OF GAS ELECTROFILTRATION

The influence of the design of electrode systems and the speed of the gas flow on the conditions of ignition and maintenance of a stable volumetric discharge in the systems of electrofiltration of gases is studied. It is established that to obtain a volume discharge, which occupies the entire interelectrode volume, it is necessary to use an electrode system of the "brush" type with a symmetrical arrangement of the precipitation electrodes. The voltage of ignition and intensive luminescence of such a discharge is 55-60 kV at a repetition rate of 1 to 3 kHz. It became possible to generate the total plasma volume up to 10 L using this electrode system. The mean electric power consumed for sustaining the stable voluminous discharge in this volume was 0.8 W. The research of the effect of gas-dynamic processes on the stability of the voluminous discharge revealed that the gas flow velocity not exceeding 20 m/s produces no effect on the ignition and sustaining of a stable discharge. To prevent the occurrence of contraction, the minimum pulse repetition rate should be proportional to the gas flow rate and inversely proportional to the length of the gas flow channel.

**Keywords:** volume discharge, electrode system, electrofiltration of industrial gases, gas flow rate, ignition modes of a volume discharge.

**Вступ.** Останнім часом об'ємний розряд все більш широко застосовується в системах комплексної пилогазоочистки екологічно небезпечних промислових об'єктів [1]. Встановлено, що для збудження об'ємних розрядів у великих об'ємах в електрофільтрах необхідно перенапруження електричного поля, частота проходження імпульсів в кілогерцовому діапазоні й наносекундний фронт імпульсів [2]. Незважаючи на велику кількість проведених досліджень, багато питань по запаленню і підтримці стабільного об'ємного розряду на розгалужених площах вістрійних електродів, що використовуються в промислових електрофільтрах, на сьогоднішній день залишаються відкритими і потребують проведення додаткових досліджень.

В даний час актуальними є завдання щодо захисту атмосфери від забруднення промисловими викидами [3, 4]. У сучасних умовах значення пилогазоочистки різко зростає, оскільки об'єми викидів відходів постійно зростають, що пов'язано як з величезними обсягами виробленої енергії, так і з використанням низькосортного палива. Посилени також вимоги до складу пилу в газах після очищення, що різко збільшило обсяги газів, які потребують газоочистки, розширена номенклатура пилу, від якого необхідно очищати повітря. Для вирішення цих завдань необхідно створення електрофільтрів нового покоління з використанням об'ємного електророзряду [2, 5], що вимагає поглибленого вивчення умов його запалювання, впливу на його параметри технологічних особливостей електрофільтрації, газодинамічних процесів в плазмі розряду й конструктивних характеристик електродних систем.

До теперішнього часу вивчені значення параметрів розряду і їх взаємозв'язки при використанні стандартних вістрійкових електродів. Знайдено умови його запалювання, характеристики горіння і можливі причини контракції [6, 7].

Використання об'ємного розряду в комбінованих системах електрофільтрації промислових викидів має свої особливості, викликані особливостями конструкції електродних систем і технологічними властивостями електрофільтрів, які визначають швидкість газового потоку [8], що істотно впливає на режими об'ємного розряду його стабільність і вимагають проведення поглиблених досліджень.

**Мета роботи.** Метою роботи є вивчення особливостей використання об'ємного розряду в комбінованих системах електрофільтрації промислових викидів, дослідження впливу конструкції електродних систем,

газодинамічних процесів в плазмі, зокрема швидкості газового потоку, на умови запалювання і підтримку стабільного об'ємного розряду.

**Матеріали дослідження.** Аналіз електродних систем електрофільтрів показав що форми і конструкції коронуючих електродів, що застосовуються в електрофільтрах вітчизняного і зарубіжного виробництва, в процесі їх вдосконалення, зазнали численних змін.

При проведенні досліджень для реалізації об'ємного струменного розряду були запропоновані вістрійних електроди типу «щітка» двох видів на ізоляційному і металевому підставі.

При заміні стандартного острійкового електрода на електрод типу «щітка» в розрядному проміжку реалізується об'ємний розряд (рис. 1).

Об'ємний розряд був реалізований як на електродах з діелектричною основою (рис. 1, а), так і на металевій основі (рис. 1, б). При малих проміжках між щіткою і осаджувальним електродом (до 80 мм) реалізується тільки об'ємний розряд. У разі збільшення проміжку одночасно спостерігається як об'ємний розряд, так і коронний розряд на паралельних електродних системах (рис. 1, в). Об'ємний розряд запалюється не миттєво з подачею напруги на проміжок, а протягом деякого часу від 30 до 60 с, в залежності від довжини розрядного проміжку. Найкращий стабільний результат при запалюванні розряду спостерігався, коли амплітуда імпульсу напруги наростала поступово за той же проміжок часу від 30 до 60 с. Симетричне розташування електрода типу «щітка» щодо осаджувальних електродів дозволяє отримати об'ємний розряд, який займає весь об'єм електродної системи (рис. 2).

Напруга запалювання такого розряду 55 кВ при частоті проходження імпульсів 1–3 кГц. Найбільш інтенсивне світіння об'ємного розряду спостерігалось при величині робочої напруги приблизно від 58 до 60 кВ. При такій напрузі в діапазоні частот проходження імпульсів від 1 до 3 кГц розряд підтримувався досить тривалий час (в даних експериментах до 30 хв.). При цьому спостерігався дуже високий вихід озону (спостерігалось потемніння ідентифікаційного фільтра). На більш тривалий період часу експериментальну установку не залишали включеною так, як в лабораторії ставало небезпечно знаходитись без спеціальної системи витяжки напрацьованого озону. На даній електродній системі вдалося генерувати загальний об'єм плазмового утворення до 10 л. Споживана з мережі середня потужність на підтримку стабільного об'ємного розряду в даному об'ємі становила 0,8 кВт.





а



б



в

а – вістрійковий електрод типу «щітка» на ізоляційній основі; б – вістрійковий електрод типу «щітка» на металевій основі; в – одночасне отримання коронного й об'ємного розрядів на паралельних електродних системах  
Рисунок 1 – Генерація об'ємного розряду



Рисунок 2 – Об'ємний розряд, який займає весь об'єм електродної системи

Таку поведінку об'ємного розряду можна частково пояснити в рамках феноменологічної моделі [6], що розглядає розвиток розряду в попередньо іонізованому середовищі між двома плоскими електродами при подачі на них високовольтного імпульсу з фронтом наростання напруги  $t_{\text{ф}}$ . Дана модель пояснює появу цуга лавин від катода до анода. Оскільки швидкість руху електронів уздовж силових ліній поля більше, ніж в інших напрямках, то електрони при своєму дрейфі від катода до анода утворюють цуг лавин, що йдуть по сліду один одного і формують струмову нитку. При цьому радіус нитки  $R_n$  буде збільшуватися зі швидкістю дифузії електронів. Одночасно з розширенням нитки буде наростати число електронів та іонів в ній. У міру наростання концентрації електронів та іонів швидкість розширення нитки буде сповільнюватися через гальмування електронів полем іонів і швидкість її розширення почне визначатися швидкістю руху іонів. Це трапиться, коли радіус нитки  $R_n$  стане рівним радіусу Дебая. Тоді, прирівнюючи радіус нитки до радіусу Дебая і вводячи величину  $n_{0\text{кр}} = 1/R_n^3$ , можна визначити  $n_{0\text{кр}}$ . Якщо  $n_0 < n_{0\text{кр}}$ , то розряд буде складатися з безлічі тонких дифузних ниток, які в сукупності створюють враження однорідного розряду. Ниткоподібна структура розряду спостерігалася під час вирізання оптичним способом тонкої смужки розряду. Крім того, при зростанні  $n_0$  до  $n_{0\text{кр}}$  гранична енергія, що вводиться в газ, буде рости внаслідок збільшення числа ниток, а отже, і площі, займаної розрядом, що також встановлено в експериментах [7]. Однак, якщо навіть вдається сформувати однорідний плазмовий стовп ( $n_0 = n_{0\text{кр}}$ ), це є необхідною, але не достатньою умовою збудження розряду в об'ємній формі. На розглянутій стадії, коли існує плазмовий стовп, катодного падіння потенціалу, що забезпечує самопідтримку розряду, ще не сформовано, важливою умовою формування однорідного розряду є забезпечення рівномірної емісії (виходу) електронів з поверхні катода.

Ця умова може бути реалізовано тільки за рахунок бомбардування катода фотонами з плазмового стовпа. Причому через неідеальність катода і необхідність зменшення впливу неоднорідності емісії, що

виникає за рахунок інших факторів, потрібно, щоб фотоемісія перевищувала інші види емісії від 50 до 100 разів. При цьому число квантів, які вибивають електрони з катода, пропорційно об'єму плазмового стовпа  $V$  і концентрації електронів в ньому  $n$ . Для забезпечення вибивання електронів в потрібній кількості значення  $nV$  має бути більше деякої критичної величини  $(nV)_{кр}$ , яка залежить від умов запалювання розряду. Таким чином, вимоги до  $n_0$  у великих і малих об'ємах різні. Якщо в малих об'ємах для збудження об'ємного розряду необхідно виконати тільки умову по перекриттю струмових ниток, то в великих об'ємах вимоги до  $n_0$  зростають і диктуються умовою  $nV \geq (nV)_{кр}$ . Відповідно до цієї моделі, на тривалість фронту високовольтного імпульсу накладається додаткове обмеження: вона не повинна бути менше часу перекриття струмових ниток.

Були проведені дослідження впливу швидкості потоку повітря на запалювання і підтримку стабільного об'ємного розряду. Дослідження проведені на макеті електродної системи з продувкою повітря на вістрях типу «щітка» (рис. 3). Швидкість потоку повітря регулювалася в діапазоні від 0 до 20 м/с.



Рисунок 3 – Макет електродної системи з продувкою повітря на вістрях типу «щітка»

Результати експериментальних досліджень показали, що при швидкості 20 м/с, спостерігається невелике здування плазми із зони області розряду (темна область в правій нижній частині міжелектродного проміжку). В цьому випадку спостерігалася і тимчасова затримка запалювання розряду на час від 40 до 50 с. При швидкостях потоку менше 20 м/с плазмова область розряду і час затримок запалювання залишалися ідентичними варіанту без потоку повітря.

Проведені експериментальні дослідження об'ємного розряду показали необхідність врахування газодинамічних процесів в плазмі. Першим необхідно вирішити питання про вплив газодинамічних процесів на стійкість розряду. Згідно з наведеними експериментальними даними потік швидкістю до 20 м/с зовні не впливає на запалювання і підтримку стабільного роз-

ряду, проте в плазмі можливе виникнення різного роду нестійкостей, які можуть призводити до контракції розряду або здування плазми. Самі параметри об'ємної плазми, створюваної стаціонарними розрядами з конвективним охолодженням, обмежені нестійкостями, що розвиваються в плазмі. З цієї причини значення параметрів плазми, які досяжні в стаціонарних розрядах в газових потоках, обмежені умовою

$$l/v = \tau_x, \quad (1)$$

де  $l$  – розмір каналу прокачування газу, м;  $v$  – швидкість потоку газу, м/с;  $\tau_x$  – характерний час розвитку нестійкостей плазми, с.

При виконанні умови (1) збурення, що накопичуються, будуть винесені з розрядної зони раніше, ніж вони встигнуть розвинути і порушити однорідність плазми.

Одним із способів збудження конвективно охолоджуваних газових середовищ, які допускають можливість широкої варіації параметрів плазми, є здійснення імпульсно-періодичного режиму підтримки газового розряду. При виконанні умови (1) наступний імпульс струму з'явиться не раніше ніж через час  $T = l_0/v$ . За цей час з одного боку, середовище встигне охолотитися до наступного імпульсу, а з іншого – в процесі збудження знімається обмеження (1). Це означає, що в імпульс може мати параметри, властиві не стаціонарному, а імпульсному розряду. Наприклад, швидкість виділення енергії в імпульсі не обмежена умовою (1) і тому може бути значно вищою, ніж середня швидкість виділення енергії.

Основними фізичними причинами, що обмежують значення граничної частоти проходження імпульсів розрядного струму, є адиабатичне розширення області нагрітого розрядом газу, наявність градієнтів щільності газу в розрядному об'ємі за рахунок акустичних коливань і розвиток перегрівно-акустичної нестійкості.

Вплив зазначених ефектів можна в значній мірі зменшити відповідним підбором елементів газодинамічного каналу електрофільтру. Так, адиабатичне розширення гарячого газу по потоку вгору можна обмежити, використовуючи вхідний канал малого перерізу. Розвиток же перегрівно-акустичної нестійкості, що відбувається при збігу частоти проходження імпульсів з будь-якою з власних частот акустичного резонатора, можна приглушити зміною довжини каналу, через який прокачується газ.

**Висновки.** Проведені дослідження впливу конструкції електродних систем на умови запалювання і підтримки стабільного об'ємного розряду показали, що для отримання об'ємного розряду, що займає весь міжелектродний об'єм, необхідне застосування електродної системи типу «щітка» з симетричним розташуванням щодо осаджувальних електродів. Напряга запалювання і інтенсивного світіння такого розряду 55–60 кВ при частоті проходження імпульсів від 1 до 3 кГц. На даній електродній системі вдалося генерувати загальний об'єм плазмового утворення до 10 л. Споживана з мережі середня потужність на підтримку стабільного об'ємного розряду в даному об'ємі стано-

вила 0,8 кВт.

Дослідження впливу газодинамічних процесів на стійкість об'ємного розряду показали, що швидкість газового потоку до 20 м/с зовні не впливає на запалювання і підтримку стабільного розряду, проте в плазмі можливе виникнення різного роду нестійкостей, які можуть призводити до контракції розряду. Для недопущення причин виникнення контракції мінімальна частота проходження імпульсів  $f_{\min}$  повинна бути пропорційна швидкості потоку газу  $v$  і обернено пропорційна довжині каналу  $l_0$  прокачування газу. У цьому випадку за час між імпульсами іонізовані молекули газу будуть видалені з міжелектродного об'єму, що усуне вплив газодинамічних нестійкостей на розряд.

#### Список літератури:

1. Богуславский Л.З. Создание макетных образцов высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов / Л.З. Богуславский, Л.Н. Мирошниченко, В.В. Диордийчук, Д.В. Винниченко, Н.С. Ярошинский // Вестник «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2012. – № 52 (958). – Х.: НТУ «ХПИ». – С. 31-39.
2. Богуславский Л.З. Электрофильтрация разноимпедансных газовых выбросов в комплексной системе пылегазоочистки экологически опасных промышленных объектов / Л.З. Богуславский, Л.Н. Мирошниченко // Вестник «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2014. – № 21. – Х.: НТУ «ХПИ». – С. 12-16.
3. Родионов А.И. Технологические процессы экологической безопасности / А.И. Родионов, В.Н. Клушин, В.Г. Систер // Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. – 800 с.
4. Чекалов Л.В. Основы разработки и конструирования электрофильтров нового поколения / Л.В. Чекалов // ИнформЦем. – 2006. – № 5. – С. 67-69.
5. Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.М., Диордийчук В.В. Пат. 90293, Україна. Спосіб деструкції різноімпедансних газових викидів небезпечних промислових об'єктів. Заявник та патентовласник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. – № u 2013 11731; заявл. 04.10.2013; опубл. 26.05.14. Бюл. № 10.
6. Мезяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника / Г.А. Мезяц // М.: Наука, 2004. – 704 с.
7. Осипов В.В. Самостоятельный объемный разряд / В.В. Осипов // УФН. – 2000. – Т. 170. – С. 225-245.
8. Богуславский Л.З. Влияние режимов работы высоковольтного источника питания на формирование стримерного ко-

ронного разряда и эффективность систем газоочистки / Л.З. Богуславский, Л.Н. Мирошниченко, Ю.Г. Казарян, Н.С. Ярошинский // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч. 1. – 2011. – С. 44-49.

#### References (transliterated):

1. Boguslavskij L.Z., Myroshnychenko L.N., Dyordiychuk V.V., Vynnychenko D.V., Yaroshynskij N.S. Sozdanie maketnyh obrazcov vysokovoltного oborudovaniya kompleksnyh sistem elektrofilitracii ekologicheski opasnyh promyshlennyh vybrosov [Creation of prototypes of high-voltage equipment for complex electrofiltration systems for environmentally hazardous industrial emissions]. Vestn. Khar'k. politehn. in-ta, 2012. No 52 (958). P. 31-39.
2. Bohuslavskyy L.Z., Myroshnychenko L.N. Elektrofiltratsyya raznoympedansnykh hazovykh vybrosov v kompleksnoy systeme pyl'egazoochystky ekologichesky opasnykh promyshlennykh ob'yektov [Electrophiltraion of different-impedance gas emissions in a complex dust-gas cleaning system of environmentally hazardous industrial facilities] // Vestn. Khar'k. politehn. in-ta, 2014. No 21. P. 12-16.
3. Rodionov A.I., Klushin V.N., Sister V.G. Tehnologicheskie protsessy ekologicheskoy bezopasnosti [Technological processes of ecological safety]. Kaluga: Izd N. Botchkareva, 2000. 800 p.
4. Chekalov L. V. Osnovy razrabotki i konstruirovaniya elektrofiltrov novogo pokoleniya [Fundamentals of design and development of a new generation of electrostatic]. InformCement. 2006. № 5. P. 67-69.
5. Bohuslavskyy L.Z., Myroshnychenko L.M., Diordiychuk V.V. Spisib destruktivnykh riznoimpedansnykh hazovykh vykydiv nebezpechnykh promyslovykh ob'yektiv [Method of destruction of multi-impedance gas emissions of hazardous industrial objects]. Pat. 90293 Ukrainy, № u 2013 11731; zayavl. 04.10.2013; opubl. 26.05.14. Byul. No 10.
6. Mesyats G.A. Impulsnaya energetika i elektronika [Impulse power and electronics]. Moscow: Nauka, 2004. 704 p.
7. Osipov V.V. Samostoyatelnyy ob'emnyy razryad [Self-contained volume discharge]. UFN. 2000. Vol. 170. P. 225-245.
8. Boguslavskij L.Z., Myroshnychenko L.N., Kazaryan Yu.G., Yaroshynskij N.S. Vlijanie rezhimov raboty vysokovoltного istochnika pitaniya na formirovanie strimernogo koronnogo razrjada i effektivnost sistem gazoochystki [Influence of operating modes of a high-voltage power source on the formation of a streamer corona discharge and the efficiency of gas cleaning systems]. Tehn. elektrodinamika. Tem. vyp. Sylova elektronika ta energotfektyvnist. 2011. P. 44-49.

Надійшла (received) 30.03.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Богуславський Леонід Зіновійович (Богуславский Леонид Зиновьевич, Bohuslavskiy Leonid Zinoviiovych)** – кандидат технічних наук, доцент, зав. відділу імпульсних електротехнічних систем, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв; e-mail: dres@iipr.com.ua.

**Козирев Сергій Сергійович (Козырев Сергей Сергеевич, Kozurev Serhij Serhijovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв; e-mail: skozurev@gmail.com.

**Овчиннікова Лариса Єфремівна (Овчинникова Лариса Ефремовна, Ovchynnikova Larysa Yefremivna)** – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв; e-mail: lora947@gmail.com.

**Адамчук Юрій Олегович (Адамчук Юрий Олегович, Adamchuk Yuriy Olehovych)** – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв.

**Чущак Сергій Володимирович (Чущак Сергей Владимирович, Chushchak Serhij Volodymyrovych)** – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв.

УДК 621.98.044.06

**А.Ю.БОНДАРЕНКО****ПЛОСКИЙ ИНДУКТОР С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ  
ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ УЧАСТКА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЛИСТА**

Проведен анализ распределения касательной компоненты напряженности магнитного поля с двух сторон плоского металлического немагнитного листа при воздействии на него поля индуктора, включенного в разрядные цепи двух разночастотных магнитно-импульсных установок. Токи в индукторе имеют взаимно противоположное направление. Проанализировано влияние параметров разрядных токов на величину распределенных сил притяжения–отталкивания, действующих на листовую заготовку, результаты позволяют сделать оптимальный выбор для получения максимальной величины сил притяжения в данной конструкции индуктора.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная установка, разрядный ток, напряженность магнитного поля, плоский металлический лист, силы притяжения, амплитудно-временные параметры.

**О.Ю. БОНДАРЕНКО****ПЛОСКИЙ ИНДУКТОР З ДВОМА ДЖЕРЕЛАМИ ЖИВЛЕННЯ  
ДЛЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО ТЯЖІННЯ ДІЛЯНКИ МЕТАЛЕВОГО ЛИСТА**

Проведен аналіз розподілу дотичної компоненти напруженості магнітного поля з двох сторін плоского металевого немагнітного листа при дії на нього поля індуктора, увімкненого в розрядні ланцюги двох різночастотних магнітно-імпульсних установок. Струми в індукторі мають взаємно протилежний напрям. Проаналізовано вплив параметрів розрядних струмів на величину розподілених сил тяжіння-відштовхування, що діють на листову заготовку, результати дозволяють зробити оптимальний вибір для отримання максимальної величини сил тяжіння в цій конструкції індуктора.

**Ключові слова:** магнітно-імпульсна установка, розрядний струм, напруженість магнітного поля, плоский металевий лист, сили тяжіння, амплітудно-часові параметри.

**A.YU. BONDARENKO****THE PLANE INDUCTOR WITH TWO POWER SOURCES  
FOR MAGNETIC-PULSE ATTRACTION OF AREA METAL SHEET**

The theoretical analysis of a magnetic field intensity tangent component distribution from the both sides of a flat metal nonmagnetic sheet is carried out, one side of the sheet exposed to magnetic field of the flat inductor. The inductor is connected to discharge circuits of two magnetic-pulse plants. The frequency of the first plant discharge circuit is a few kilohertz, while that of the other plant discharge circuit is about dozens of kilohertz. The inductor currents are mutually opposite. Densities of surface currents in the inductor have uniform distribution. The discharge currents in the inductor create both attractive forces and repulsion forces that act on the metal sheet. The influence of the amplitude-time parameters of the discharge currents on the magnitude of the attractive forces and repulsion forces is analyzed.

**Keywords:** magnetic-pulse plant, discharge current, tension of magnetic-field, flat metallic sheet, attractive powers, amplitude-temporal parameters.

**Введение.** С шестидесятих годов прошлого столетия на предприятиях машиностроительной, авиационной, электротехнической промышленности стала внедряться магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ). Основной технологией применения МИОМ являлась схема, в которой действующие на обрабатываемую заготовку силы, направлены от индуктора к поверхности заготовки. К такой технологии относятся следующие операции МИОМ: обжим и раздача цилиндрических заготовок, листовая штамповка плоских заготовок [1]. В настоящее время, в соответствии с требованиями производства, стала применяться технология МИОМ, при которой поперечные силы имеют диаметрально противоположное направление, а именно, направлены от поверхности заготовки к индуктору, т.е. имеет место притяжение обрабатываемой заготовки к индуктору. Такая технология МИОМ мо-

жет использоваться для расширения труб малого диаметра [2], т.к. нет возможности применить внутренний индуктор для раздачи трубы, для обработки закрытых металлических сосудов, основное применение: рихтовка вмятин на корпусах летательных аппаратов и автомобилей внешним индуктором [3,4,5]. Операция притяжения участка заготовки к индуктору требует более сложного оборудования, чем классическая технология МИОМ, и может осуществляться разными способами [3], один из которых, заключается в создании с помощью схемных решений и индукторных систем импульсного магнитного поля, воздействующего на заготовку, с пологим фронтом и резким спадом [6]. Для создания импульса такой формы может быть использована двухчастотная схема магнитно-импульсной установки (МИУ), в которой индукторная система состоит из двух катушек, каждая подключена

© А.Ю.Бондаренко, 2018

к своей МИУ. На одну катушку (индуктор) разряжается МИУ, разрядный ток которой имеет высокую частоту порядка нескольких десятков килогерц, а вторая включена в разрядную цепь МИУ с низкой частотой порядка единиц килогерц. Такая схема позволяет получить импульс магнитного поля с пологим фронтом, при этом поле проникает сквозь заготовку, и резким спадом напряженности при достижении максимального значения. Это достигается включением в определенный момент времени второй катушки, через которую протекает ток высокой частоты, а создаваемое им поле направлено противоположно по отношению к «медленному» полю первой катушки. Суперпозиция этих полей приводит к тому, что над обрабатываемой заготовкой напряженность магнитного поля резко падает, в то время, как с обратной стороны заготовки «медленное» поле остается практически неизменным. В определенный временной интервал на заготовку будет действовать сила притяжения, направленная к индукторам. Принцип действия этой схемы с подробным математическим анализом процессов представлен в работе [7].

На практике изготовление и применение индукторной системы, состоящей из двух катушек представляет определенные трудности. Для упрощения конструкции индуктора при использовании двух МИУ с разной частотой разрядного контура можно использовать одну катушку, в которой будет происходить суперпозиция токов двух МИУ.

**Цель работы.** Получение амплитудно-временных зависимостей для расчета распределенных сил притяжения-отталкивания, возникающих в плоской индукторной системе и действующих на листовую металлическую немагнитную заготовку, при разряде на индуктор низко- и высокочастотной МИУ.

**Основная часть.** Схематически, плоский индуктор, с внешним радиусом  $R_2$  и внутренним  $R_1$ , расположенный на расстоянии  $h$  от обрабатываемой заготовки, толщиной  $d$  и удельной электропроводностью металла  $\gamma$ , и включенный в разрядные цепи двух МИУ, представлен на рис. 1. Начало цилиндрической системы координат находится на поверхности заготовки под центром витка индуктора, ось  $z$  перпендикулярна плоскости заготовки и направлена в сторону индуктора.

Расчет электромагнитных процессов проведен в два этапа в приближении заданных разрядных токов МИУ, протекающих в индукторе, которые определяются параметрами разрядных контуров, а поверхностная плотность их в индукторе распределена равномерно [7]. Результирующее магнитное поле в системе находится суперпозицией полей, создаваемых разрядными токами двух МИУ, протекающими в индукторе.

Уравнения Максвелла для возбуждаемых в системе составляющих вектора электромагнитного поля, преобразованных по Лапласу с учетом нулевых начальных условий, имеют вид:

$$\frac{\partial H_r(p,r,z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p,r,z)}{\partial r} = j_\varphi(p,r,z); \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rE_\varphi(p,r,z)) = -\mu_0 p H_z(p,r,z); \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_\varphi(p,r,z)}{\partial z} = \mu_0 p H_r(p,r,z), \quad (3)$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;  $j_\varphi(p,r,z)$  – плотность стороннего тока в катушке;

$$j_\varphi(p,r,z) = j(p) \cdot (\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)) \cdot \delta(z - h);$$

$$j(p) = \frac{I(p) \cdot w}{(R_2 - R_1)} [8]; \quad I(p) = L\{I(t)\};$$

$$E_\varphi(p,r,z) = L\{E_\varphi(t,r,z)\}; \quad H_{r,z}(p,r,z) = L\{H_{r,z}(t,r,z)\};$$

$\eta(r)$  и  $\delta(z)$  – ступенчатая и импульсная функции, соответственно [9].

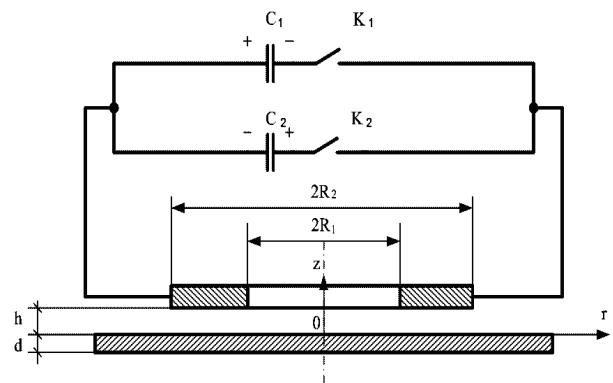


Рисунок 1 – Расчетная схема плоской индукторной системы с двумя источниками питания

Из дифференциальных уравнений – (1) – (3) с учетом принятых допущений можно получить уравнения для азимутальной компоненты напряженности электрического поля –  $E_\varphi(p,r,z)$  в трех областях: над листовой заготовкой,  $z \geq 0$ , в металле заготовки,  $z \in [-d, 0]$ , под листовой заготовкой,  $z \leq -d$ . Условие ограниченности радиального распределения  $E_\varphi(p,r,z)$  при  $r = 0$  и  $r = \infty$  удовлетворяет интегральное преобразование Фурье-Бесселя [9].

После применения интегрального преобразования Фурье-Бесселя уравнения для азимутальной компоненты напряженности электрического поля в трех рассматриваемых областях приводятся к обыкновенным дифференциальным уравнениям второго порядка. Подробное решение вышеуказанных уравнений приведено в работе автора [7]. Окончательные выражения для расчета пространственно-временного распределения касательной компоненты напряженности магнитного поля на поверхностях обрабатываемой плоской листовой заготовки имеют вид:

– для низкочастотной МИУ

а) над листом

$$H_1(t,r,z=0) \approx \frac{-j_1(t)}{2} \cdot \int_0^\infty \left[ \int_{(\lambda R_1)}^{(\lambda R_2)} x J_1(x) dx \right] \times e^{-\lambda h} J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (3)$$

б) под листом

$$H_1(t, r, z = -d) \approx \frac{-j_1(t)}{2} \cdot \int_0^{\infty} \left[ \int_{(\lambda R_1)}^{(\lambda R_2)} x J_1(x) dx \right] \times \\ \times \frac{e^{-\lambda(h+d)}}{\lambda} J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (4)$$

– для высокочастотной МИУ

а) над листом

$$H_2(t, r, z = 0) \approx -j_2(t) \cdot \int_0^{\infty} \left[ \int_{(\lambda R_1)}^{(\lambda R_2)} x J_1(x) dx \right] \times \\ \times \frac{e^{-\lambda h}}{\lambda} J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (5)$$

б) под листом

$$H_2(t, r, z = -d) \approx \frac{-\int_0^t j_2(\tau) d\tau}{(\mu_0 \gamma d)} \cdot \int_0^{\infty} \left[ \int_{(\lambda R_1)}^{(\lambda R_2)} x J_1(x) dx \right] \times \\ \times e^{-\lambda h} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (6)$$

где  $j_{1,2}(t)$  – поверхностная плотность тока в катушке от низко- и высокочастотной МИУ [8],

$j_{1,2}(t) = \frac{I_{1,2}(t)w}{(R_2 - R_1)}$ ,  $I_{1,2}(t)$  и  $w$  – разрядный ток низко- и высокочастотной МИУ, и число витков в катушке, соответственно.

Из выражений (3), (5) получим суммарную напряженность магнитного поля на внутренней поверхности плоской заготовки (поверхность со стороны индуктора).

$$H_{\text{вн}}(t, r, z = 0) = 0,5 \cdot j_{\text{max}} \cdot G_1(\varphi) \cdot \Phi_1\left(\frac{r}{R_2}\right), \quad (7)$$

где  $G_1(\varphi)$  – временная функция результирующего поля,  $\varphi = 2\pi f_1 t = \omega_1 t$ ,  $f_1$  – частота разрядного тока низкочастотной МИУ.

$$G_1(\varphi) = e^{-\delta_1 \varphi} \cdot \sin(\varphi) - A \cdot e^{-\delta_1 \frac{f_2}{f_1} (\varphi - \varphi_0)} \times \\ \times \sin\left(\frac{f_2}{f_1} (\varphi - \varphi_0)\right);$$

$$A = \frac{j_{2\text{max}}}{j_{1\text{max}}}; \quad \varphi_0 \approx \frac{\pi}{2},$$

$\delta_1$  – относительный декремент затухания,  $\Phi_1\left(\frac{r}{R_2}\right)$  –

функция пространственного распределения

$$\Phi_1\left(\frac{r}{R_2}\right) = \int_0^{\infty} \left[ \int_{\frac{y}{R_2}}^y x \cdot J_1(x) dx \right] \cdot \frac{e^{-y \frac{h}{R_2}}}{y} \cdot J_1\left(y \cdot \frac{r}{R_2}\right) dy.$$

Напряженность результирующего поля на внешней поверхности листовой заготовки находим с помощью выражений (4), (6):

$$H_{\text{нар}}(t, r, z = -d) = 0,5 \cdot j_{1\text{max}} \cdot \left( G_2(\varphi) \cdot \Phi_2\left(\frac{r}{R_2}\right) - \right. \\ \left. - G_3(\varphi) \cdot \Phi_3\left(\frac{r}{R_2}\right) \right), \quad (8)$$

где  $G_{2,3}(\varphi)$  – временные функции,  $\varphi$  – фаза возбуждаемого низкочастотного поля,

$$G_2(\varphi) = e^{-\delta_1 \varphi} \cdot \sin(\varphi);$$

$$G_3(\varphi) = \frac{A}{1 + \delta_2^2} - \frac{A}{1 + \delta_2^2} \cdot e^{-\delta_2 \frac{f_2}{f_1} (\varphi - \varphi_0)} \times \\ \times \left[ \delta_2 \cdot \sin\left(\frac{f_2}{f_1} (\varphi - \varphi_0)\right) + \cos\left(\frac{f_2}{f_1} (\varphi - \varphi_0)\right) \right];$$

$\Phi_2\left(\frac{r}{R_2}\right)$ ,  $\Phi_3\left(\frac{r}{R_2}\right)$  – функции пространственного распределения,

$$\Phi_2\left(\frac{r}{R_2}\right) = \int_0^{\infty} \left[ \int_{\frac{y}{R_2}}^y x \cdot J_1(x) \cdot dx \right] \times \frac{e^{-y \frac{h+d}{R_2}}}{y} \cdot J_1\left(y \cdot \frac{r}{R_2}\right) \cdot dy;$$

$$\Phi_3\left(\frac{r}{R_2}\right) = \left( \frac{\Delta^2}{d \cdot R_2} \right) \cdot \int_0^{\infty} \left[ \int_{\frac{y}{R_2}}^y x \cdot J_1(x) \cdot dx \right] \times$$

$$\times e^{-y \frac{h}{R_2}} \cdot J_1\left(y \cdot \frac{r}{R_2}\right) \cdot dy;$$

$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega_2 \cdot \mu_0 \cdot \gamma}}$  – глубина проникновения высокочастотного поля в металл заготовки.

тотного поля в металл заготовки.

В качестве примера, рассмотрим применение полученных теоретических результатов для расчета электромагнитных и электродинамических процессов в индукторной системе, эскиз которой представлен на рис. 1. Геометрия индукторной системы следующая:  $R_1 = 0,025$  м,  $R_2 = 0,063$  м,  $h = 0,003$  м. Обрабатываемый стальной лист имеет толщину  $d = 0,0008$  м, удельная электропроводность которого равна  $\gamma = 0,6 \cdot 10^7$  1/Ом·м. На вход индукторной системы подаются токовые импульсы от двух МИУ, временные зависимости которых функционально одинаковы и представляют собой экспоненциально затухающие синусоиды:

$$j_{1,2}(t) = j_{1,2\text{max}} \cdot e^{-\delta_{1,2}(\omega_{1,2} t)} \cdot \sin(\omega_{1,2} \cdot t).$$

Индекс «1» относится к низкочастотному разрядному току, а «2» – к высокочастотному. Относительные декременты затухания у обоих импульсов одинаковы  $\delta_{1,2} = 0,2$ . рабочая частота низкочастотного импульса  $f_1 = 2,2$  кГц, высоко-частотного –  $f_2 = 30$  кГц, моменты включения импульсов смещены на величину  $\Delta t \approx \pi/(2 \cdot \omega_1)$ , отношение амплитуд плотностей токов в индукторе  $A = 1$ .

Найдем пространственно-временное распределение касательной компоненты напряженности магнитного поля на поверхностях обрабатываемого листа,

временной характер взаимодействия возбуждаемых полей, пространственные зоны максимального электродинамического воздействия на обрабатываемый лист.

На рис.2 представлено временное (рис. 2, а) и пространственное (рис. 2, б) распределение касательной составляющей напряженности результирующего магнитного поля на внутренней поверхности металлического листа.

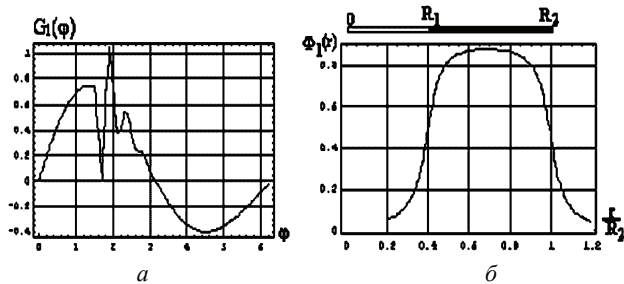


Рисунок 2 – Распределение касательной составляющей напряженности результирующего магнитного поля на внутренней поверхности металлического листа:

а – временное; б – пространственное

Из приведенного рисунка видно, что зона практически однородного поля находится в интервале  $r/R_2 = 0,5 \pm 0,9$ .

Графики на рис. 3 иллюстрируют диффузионные процессы в листовой заготовке. На рис. 3 представлены временные зависимости магнитных полей, проникших сквозь листовую заготовку на ее внешней поверхности: рис. 3, а – низкочастотная составляющая, рис. 3, б – высокочастотная составляющая, рис. 3, в – функция результирующего поля в центре рабочей зоны  $r = 0,5(R_1 + R_2)$ .

Результат анализа графиков на рис. 3 показывает, что высокочастотная составляющая вносит незначительный вклад в формирование результирующего поля на внешней поверхности листовой заготовки. Временная функция результирующего поля формируется, в основном, низкочастотным сигналом (рис. 3, в). Вклад высокочастотной составляющей приводит к незначительному искажению кривой во временном интервале, соответствующем включению высокочастотного импульса в индукторе.

Результаты численной реализации выражений

$$\Phi_2\left(\frac{r}{R_2}\right), \Phi_3\left(\frac{r}{R_2}\right)$$

представлено пространственное распределение амплитудных значений касательной компоненты напряженности магнитного поля на внешней поверхности металлического листа: рис. 4, а – низкочастотная составляющая, рис. 4, б – высокочастотная составляющая, рис. 4, в – результирующее поле в момент времени соответствующий максимуму высокочастотной составляющей  $\varphi = 1,8$ .

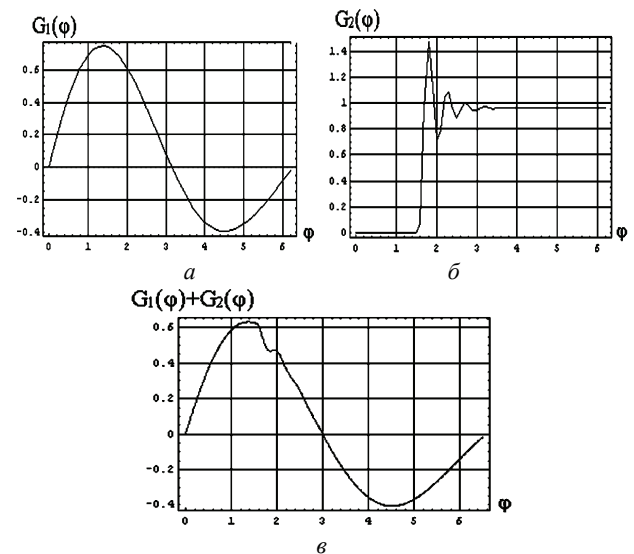


Рисунок 3 – Временные зависимости магнитных полей, проникших сквозь листовую заготовку на ее внешней поверхности:

а – низкочастотная составляющая; б – высокочастотная составляющая; в – функция результирующего поля в центре рабочей зоны  $r = 0,5(R_1 + R_2)$

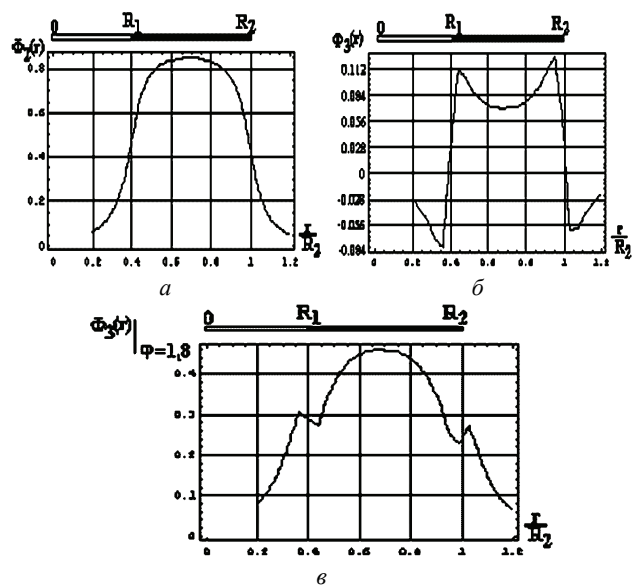


Рисунок 4 – Пространственное распределение амплитудных значений касательной компоненты напряженности магнитного поля на внешней поверхности металлического листа: а – низкочастотная составляющая; б – высокочастотная составляющая; в – результирующее поле в момент времени соответствующий максимуму высокочастотной составляющей  $\varphi = 1,8$

Результатом анализа проведенных расчетов является вывод о том, что в рассматриваемом варианте индукторной системы вклад высокочастотной составляющей в формирование результирующего поля на внешней поверхности листовой заготовки незначителен. Приблизительно это можно оценить величиной амплитуды функции пространственного распределения высокочастотного поля, проникшего сквозь заготовку  $\Delta^2/(d \cdot R_2) \approx 0,0279 \ll 1$ .

Проанализируем временные процессы притяже-

ния–отталкивания листовой заготовки к индуктору при воздействии магнитных полей с принятыми параметрами. На рис. 5 приведена временная функция распределенной силы, действующей на заготовку в центре рабочей зоны, которая определяется из выражения  $F(\varphi) \sim H_{нар}^2 - H_{ви}^2$ . При  $F(\varphi) > 0$  происходит притяжение заготовки к индуктору, при  $F(\varphi) < 0$  меньше нуля – отталкивание. Полностью, величина распределенной силы, действующей на листовую заготовку, определяется выражением:

$$P(\varphi) \approx \frac{\mu_0}{8} \cdot \left( \frac{I_{max}}{R_2 - R_1} \right) \cdot F(\varphi), \quad (9)$$

где  $I_{max}$  – амплитуда тока в индукторе.

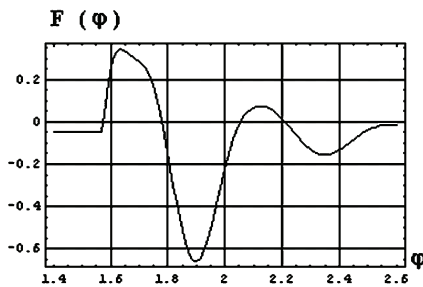


Рисунок 5 – Временная зависимость распределенной силы, действующей на листовую заготовку в центре рабочей зоны

Из рис. 5 видно, что при принятом режиме работы двухчастотной МИУ, на листовую заготовку будет действовать сила притяжения, первый максимум которой соответствует моменту подавления низкочастотного поля над заготовкой, отрицательной по отношению к нему, полувольтной высокочастотного поля (см. рис. 2, а). На заготовку будет действовать и сила отталкивания. Ее первый максимум соответствует второй полувольтной высокочастотного поля, положительной по отношению к низкочастотной составляющей (см. рис. 2, а). Отношение амплитуды распределенной силы притяжения к амплитуде распределенной силы отталкивания заготовки к индуктору в данном случае равно  $K \approx 0,7$ . Следовательно, для обеспечения работоспособности рассмотренной индукторной системы необходимо уменьшить возбуждаемые силы отталкивания, что возможно сделать выбором другого амплитудно-временного режима работы индукторной системы.

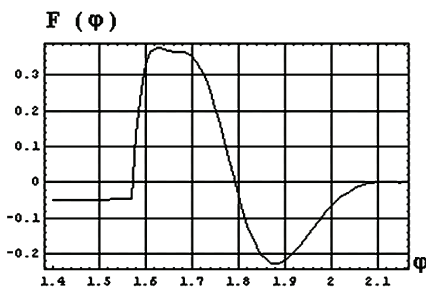


Рисунок 6 – Временная зависимость распределенной силы притяжения–отталкивания, действующей на листовую заготовку при следующих параметрах разрядных токов:  $f_1 = 2,2$  кГц;  $\delta_1 = 0,2$ ;  $f_2 = 30$  кГц;  $\delta_2 = 0,5$ ;  $A = 1,5$

Используя полученные формулы, проведены расчеты сил притяжения–отталкивания для других амплитудно-временных параметров разрядных импульсов МИУ. На рис. 6 приведена временная зависимость распределенной силы притяжения–отталкивания, действующей в рассматриваемой индукторной системе на листовую заготовку при следующих параметрах разрядных токов:  $f_1 = 2,2$  кГц;  $\delta_1 = 0,2$ ;  $f_2 = 30$  кГц;  $\delta_2 = 0,5$ ;  $A = 1,5$ .

В табл. 1 приведены результаты расчетов отношения амплитуд распределенных сил притяжения к силам отталкивания, действующим на листовую заготовку при различных амплитудно-временных параметрах разрядных токов МИУ. Обозначения величин в таблице такие же, как в тексте.

Таблица 1

$f_1$ , кГц	$\delta_1$	$f_2$ , кГц	$\delta_2$	$A$	$K$
2,2	0,2	20	0,5	1,5	1,9
2,2	0,2	10	0,5	1,3	3,4
2,2	0,2	7	0,5	1,3	6
2,2	0,2	5	0,5	1,3	28

Результаты вычислений, приведенные в табл. 1, показывают, что уменьшение частоты высокочастотного разрядного тока при определенном выборе амплитуды и относительного декремента затухания приводит к снижению амплитуд сил отталкивания. Однако, понижение частоты приводит к росту значимости диффузионных эффектов, что, в свою очередь, снижает эффективность силового воздействия на заготовку в целом. Для нивелирования диффузионных эффектов требуются соответствующие конструкционные и схемные решения, при которых в индукторной системе высокочастотная составляющая в максимально возможной степени представляла плоскопараллельное магнитное поле.

### Выводы.

1. Получены аналитические выражения распределения касательной компоненты напряженности магнитного поля с двух сторон плоского металлического немагнитного листа при воздействии на него поля индуктора, включенного в разрядные цепи двух разночастотных МИУ, а также выражения для расчета распределенных сил притяжения–отталкивания, действующих на листовую заготовку.

2. Показано влияние амплитудно-временных параметров разрядных токов двух МИУ на величину распределенных сил притяжения–отталкивания, действующих на листовую заготовку.

3. Результаты расчетов позволяют производить оптимальных подбор амплитудно-временных параметров разрядных токов для получения максимального эффекта притяжения участка листовой заготовки к индуктору.

### Список литературы:

1. Белый И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. –



Х.: Вища школа, 1977. – 168 с.

2. Щеглов Б.А. Раздача тонкостенных трубчатых заготовок силами притяжения импульсного магнитного поля / Б.А. Щеглов, А.А. Есин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1971. – № 4. – С. 15-18.
3. Батыгин Ю.В. Инструмент для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, А.Ю. Бондаренко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 11 (47). – С. 44-51.
4. Бондаренко А.Ю. Инструмент для магнитно-импульсной рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов / А.Ю. Бондаренко, В.Б. Финкельштейн, Е.Ф. Еремина // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Луцьк, 2014. – Вип. № 44. – С. 11-17.
5. Бондаренко А.Ю. Внешняя рихтовка кузовов автотранспорта с помощью электродинамических систем при прямом пропускании импульсного тока / А.Ю. Бондаренко, В.Б. Финкельштейн, Т.В. Гаврилова // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Автомобіле- та тракторобудування. – 2014. – № 9 (1052). – С. 66-72.
6. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверх сильных токов / Г.А. Шнеерсон. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 416 с.
7. Бондаренко А.Ю. Электромагнитные процессы в плоской индукторной системе с двумя катушками при равномерном распределении в них поверхностных токов / А.Ю. Бондаренко // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 3. – С. 61-65.
8. Дзенисис О.Я. Расчет распределения поля плоской катушки вблизи полубесконечной проводящей среды с учетом переходного процесса / О.Я. Дзенисис, З.И. Бандер // Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук. – 1971. – № 6. – С. 78-87.
9. Мэтьюз Дж. Математические методы физики / Дж. Мэтьюз, Р. Уокер. – М.: Атомиздат, 1972. – 392 с.

#### References (transliterated):

1. Belyj I.V., Fertik S.M., Himenko L.T. Spravochnik po magnitno-impul'snoj obrabotke metallov [Handbook on magnetic pulse processing of metals]. Kharkiv: Vyshha shkola. Publ. 1977. 168 p.
2. Shheglov B.A., Esin A.A. Razdacha tonkostennyh trubchatykh zagotovok silami pritjazhenija impul'snogo magnitnogo polja [The distribution of thin-walled tubular billets by the forces of

attraction of a pulsed magnetic field]. Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo [Forging-stamping production], 1971. No.4. P. 15-18.

3. Batygin Ju.V., Lavinskij V.I., Bondarenko A.Ju. Instrument dlja magnitno-impul'snogo pritjazhenija listovykh zagotovok [Tool for magnetic-impulse attracting of sheet blanks] Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija [Aerospace engineering and technology], 2007. No. 11 (47). P. 44-51.
4. Bondarenko A.Ju., Finkel'shtejn V.B., Eremina E.F. Instrument dlja magnitno-impul'snoj rihtovki vmyatin v metallicheskih pokrytjajah avtomobil'nykh kuzovov [Tool for magnetic-impulse leveling of dents in metal coatings of automotive bodies]. Mizhvuzivs'kij zbirnik «Naukovi notatki» [Intercollegiate collection "Scientific Notes"]. Luc'k, 2014. No. 44. P. 11-17.
5. Bondarenko A.Ju., Finkel'shtejn V.B., Gavrilova T.V. Vneshnjaja rihtovka kuzovov avtotransporta s pomoshh'ju jelektrodinamicheskikh sistem pri prjamom propuskanii impul'snogo toka [External leveling of car bodies using electrodynamic systems with direct transmission of pulsed current]. Visnik NTU «KhPI». Ser.: Avtomobile- ta traktorobuduvannja [Automobile and tractor construction]. Kharkiv NTU «KhPI», 2014. No. 9 (1052). P. 66-72.
6. Shneerson G.A. Polja i perehodnye processy v apparature sverh sil'nykh tokov [Fields and transients process in apparatus of excess of strong currents]. 2-e izd., pererab. i dop. Moskva: Jenergoatomizdat. Publ. 1992. 416 p.
7. Bondarenko A.Ju. Jelektromagnitnye processy v ploskoj induktornoj sisteme s dvumja katushkami pri ravnomernom raspredelenii v nih poverhnostnykh tokov [Electromagnetic processes in a flat inductor system with two coils under uniform surface currents distribution in the coils]. Elektrotehnika i elektromehanika [Ectrotechnics and Electromechanics], 2012. No. 3. P. 61-65.
8. Dzenitis O.Ja., Bander Z.I. Raschjot raspredelenija polja ploskoj katushki vblizi polubeskonechnoj provodjashhej sredy s uchjotom perehodnogo processa [Calculation of the distribution of the field of a flat coil near a semi-infinite conducting medium, taking into account the transient process]. Izv. AN Latv. SSR. Ser. fiz. i tehn. nauk, 1971. No.6. P. 78-87.
9. Mjet'juz Dzh., Uoker R. Matematicheskie metody fiziki [Mathematical methods of physics]. Moskva: Atomizdat. Publ. 1972. 392 p.

Поступила (received) 30.03.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

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

УДК 621.317.4: 537.613

*А.В. ГЕТЬМАН, О.Л. РЕЗИНКИН***МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ГАРМОНИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Проведен сравнительный анализ основополагающих принципов, лежащих в основе методов экспериментального определения сферических гармоник магнитного поля технических объектов. Предложена классификация методов выделения вкладов и определения величин коэффициентов сферических гармоник магнитного поля. Установлены взаимосвязи между рассмотренными методами и принципами, положенными в основу функционирования соответствующих измерительных систем для практического сферического гармонического анализа магнитного поля.

**Ключевые слова:** магнитное поле, сферическая гармоника, измерительная система, технический объект, магнитный поток.

*А.В. ГЕТЬМАН, О.Л. РЕЗИНКИН***МЕТОДОЛОГІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ СФЕРИЧНИХ ГАРМОНІК МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Проведено порівняльний аналіз основних принципів, що лежать в основі методів експериментального визначення сферичних гармонік магнітного поля технічних об'єктів. Запропоновано класифікацію методів виділення вкладів і визначення величин коефіцієнтів сферичних гармонік магнітного поля. Встановлено взаємозв'язки між розглянутими методами і принципами, покладеними в основу функціонування відповідних вимірювальних систем для практичного сферичного гармонічного аналізу магнітного поля.

**Ключові слова:** магнітне поле, сферична гармоніка, вимірювальна система, технічний об'єкт, магнітний потік.

*A.V. GETMAN, O.L. REZINKIN***METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE SPHERICAL HARMONICS OF THE MAGNETIC FIELD OF TECHNICAL OBJECTS**

A comparative analysis of methods for the experimental determination of the spherical harmonics of the magnetic field of technical objects has been carried out. The fundamental principles for creation of spherical harmonics of the magnetic field have been represented. The interrelation of the established principles with metrological means of measuring of spherical harmonics of the magnetic fields is shown. A classification of the methods for separating of contributions and determining the magnitudes of the coefficients of the spherical harmonics of the magnetic field is proposed. It is proposed to use the classification as a theoretical basis for creating new methods and means for conducting a practical spherical harmonic analysis of the magnetic field of technical objects.

**Keywords:** magnetic field, spherical harmonic, measuring system, technical object, magnetic flux.

**Введение.** Практическая необходимость повышения точности моделирования и экспериментального определения пространственного распределения магнитного поля технических объектов (ТО) стимулирует процесс создания новых и модернизации существующих методов определения пространственных гармоник. При использовании в качестве простейшей математической модели внешнего магнитного поля ТО представления в виде точечного источника – магнитного диполя, пространственное распределение внешнего магнитного поля может быть описано одним вектором – магнитным дипольным моментом ТО. Однако реальное пространственное распределение магнитного поля вблизи ТО (на расстояниях сравнимых с его габаритным размером) существенно отличается от картины магнитного поля диполя. В качестве магнитных характеристик, уточняющих пространственное распределение поля, в этих случаях обычно используют сферические пространственные гармоники старшего дипольного или эквивалентные им, виртуальные точечные источники поля – мультиполи, расположенные в центре ТО.

В электродинамике отсутствуют закономерности, позволяющие производить прямой расчет величины

амплитудного коэффициента пространственной гармоники магнитного поля ТО, поэтому единственным практическим способом определения величин амплитудных коэффициентов является проведение прямых измерений других физических характеристик магнитного поля, с последующей математической обработкой результатов по специальным процедурам [1–8].

**Цель работы.** Проведенный анализ существующих методов и соответствующих измерительных систем экспериментального определения величин коэффициентов сферических гармоник направлен на выявление и классификацию основополагающих принципов создания новых методов и средств практического исследования пространственной структуры магнитного поля технических объектов.

**Анализ методов определения величин сферических гармоник.** Проведем краткий анализ возможных путей практического определения сферических гармоник скалярного потенциала внешнего магнитного поля ТО. Если записать выражение для магнитной индукции в воздухе ( $\mu = 1$ ) для нескольких  $k$  точек измерения в виде рядов:

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{B}(r_1, \theta_1, \varphi_1) = \\ = -\mu_0 \nabla \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(r_1)^{n+1}} \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos \theta_1) \left\{ \begin{aligned} g_n^m \cos m \varphi_1 \\ h_n^m \sin m \varphi_1 \end{aligned} \right\} \right); \\ \vec{B}(r_k, \theta_k, \varphi_k) = \\ = -\mu_0 \nabla \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(r_k)^{n+1}} \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos \theta_k) \left\{ \begin{aligned} g_n^m \cos m \varphi_k \\ h_n^m \sin m \varphi_k \end{aligned} \right\} \right), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $r_k, \theta_k, \varphi_k$  – сферические координаты  $k$ -й точки наблюдения магнитного поля;  $P_n^m(\cos \theta_k)$  – присоединенные функции Лежандра первого рода от угловой координаты  $k$ -й точки;  $g_n^m, h_n^m$  – амплитудные коэффициенты сферических гармоник.

Тогда, ограничив количество слагаемых бесконечного ряда некоторым конечным числом и взяв достаточное количество  $k$  точек измерения магнитной индукции для решения системы уравнений в (1), можно получить значения амплитудных коэффициентов сферических гармоник.

Такой метод был предложен К.Гауссом для расчета и описания магнитного поля Земли. Общей тенденцией, как для геомагнитного поля, так и для магнитного поля ТО, является доминирование дипольной гармоники и быстрое уменьшение величин амплитудных коэффициентов гармоник с ростом их степени. Эта особенность представления магнитного поля ТО приводит к ограничению количества достоверно определяемых гармоник, поскольку, начиная с некоторого значения  $n$  (степени гармоник), величина погрешности измеренной магнитной индукции становится больше вклада гармоник старших степеней. Поэтому даже при использовании данных, полученных современными прецизионными магнитометрами, неизбежное присутствие погрешности при измерении магнитного поля Земли ограничивает количество достоверно определяемых амплитудных коэффициентов сферических гармоник до десятой степени ( $n = 10$ ).

Поскольку реальные погрешности измерения магнитного поля ТО на два-три порядка больше чем при геомагнитных измерениях, то максимальное количество определяемых гармоник при использовании на практике метода Гаусса ограничено третьей степенью (пятнадцатью амплитудными коэффициентами).

**Методы разделения вкладов гармоник.** Повысить точность и соответственно увеличить количество определяемых пространственных гармоник оказывается возможным, если применить методы, основанные на функциональном анализе специальным образом полученных данных о пространственном распределении магнитного поля ТО. Ключевым условием применимости таких методов является получение экспериментальных данных о магнитном поле ТО в форме удобной для проведения функционального анализа по пространственным координатам. Непосредственно из вида скалярного потенциала магнитного поля, представленного рядом в (1) следует, что для выделения вклада в суммарное поле от одной гармоники могут быть использованы:

- Фурье анализ по циклической координате;

- ортогональность полиномов Лежандра по угловой координате;

- расчет на основе конечного числа уравнений с использованием свойства разной степени убывания поля при удалении от исследуемого ТО (по радиальной координате).

Для применения Фурье-анализа к каждому из уравнений в (1) необходима экспериментальная зависимость данных, полученных на одной из параллелей воображаемой сферической сетки, охватывающей ТО. Например, так, чтобы было возможно проведение интегрирования вида:

$$\int_0^{2\pi} B_r(r, \theta, \varphi) \left\{ \begin{aligned} \cos k \varphi \\ \sin k \varphi \end{aligned} \right\} d\varphi = \mu_0 \times \\ \times \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{(r)^{n+2}} \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos \theta) \int_0^{2\pi} \left\{ \begin{aligned} g_n^m \cos m \varphi \\ h_n^m \sin m \varphi \end{aligned} \right\} \left\{ \begin{aligned} \cos k \varphi \\ \sin k \varphi \end{aligned} \right\} d\varphi \right), \quad (2)$$

где  $B_r(r, \theta, \varphi)$  – радиальная компонента магнитной индукции в точке со сферическими координатами  $r, \theta, \varphi$ ;  $m$  – индекс, именуемый порядком гармоники;  $n$  – индекс, именуемый степенью гармоники.

Очевидным требованием, кроме необходимости проведения измерений магнитной индукции при неизменных радиальной и угловой координатах, является получение достаточного количества данных (точек измерения) о магнитном поле и циклической координате для проведения интегрирования по (2) расчетными методами с достаточной точностью [7].

В результате интегральной обработки зафиксированных данных о магнитной индукции как функции от циклической координаты на основании (2) из двойной суммы вкладов всех гармоник останутся только вклады от гармоник порядка  $m = k$ :

$$\int_0^{2\pi} B_r(r, \theta, \varphi) \left\{ \begin{aligned} \cos k \varphi \\ \sin k \varphi \end{aligned} \right\} d\varphi = \pi \mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{(r)^{n+2}} P_n^k(\cos \theta) \left\{ \begin{aligned} g_n^k \\ h_n^k \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Если дальнейшую математическую обработку экспериментальных данных проводить, например, с использованием свойства ортогональности функций Лежандра, то для этого необходимы данные обработки по (3), проведенные для некоторого количества параллелей, чтобы обеспечить проведение интегрирования по формуле:

$$\int_0^{\pi} \left[ \int_0^{2\pi} B_r(r, \theta, \varphi) \left\{ \begin{aligned} \cos k \varphi \\ \sin k \varphi \end{aligned} \right\} d\varphi \right] P_s^k(\cos \theta) d(\cos \theta) = \pi \mu_0 \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{(r)^{n+2}} \int_0^{\pi} P_n^k(\cos \theta) P_s^k(\cos \theta) d(\cos \theta) \left\{ \begin{aligned} g_n^k \\ h_n^k \end{aligned} \right\} = \\ = \frac{2\pi \mu_0 n}{(r)^{n+2}} \frac{1}{2s+1} \frac{(s+k)!}{(s-k)!} \left\{ \begin{aligned} g_s^k \\ h_s^k \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Прямое применение двойной интегральной обработки данных о магнитной индукции (4) решает задачу об экспериментальном определении величин амплитудных коэффициентов пространственных гармоник магнитного поля ТО, находящегося внутри воображаемого шара радиуса  $r$  на котором расположены магнитометрические датчики.

Другим вариантом дальнейшей математической обработки (3) является использование алгоритмов

расчета, построенных на свойстве различной скорости убывания сферических гармоник разных степеней при удалении от источника поля (исследуемого ТО). Для этого используют данные о трех проекциях магнитной индукции, зафиксированные на четырех параллелях с разными радиусами, лежащих в воображаемой экваториальной плоскости ( $\theta = \pi/2$ ) сферической системы координат, привязанной к центру ТО. Для проведения расчетов величин амплитудных коэффициентов гармоник ограничивают их рассматриваемое количество максимальной старшей степенью, полагая  $n \leq 4$ . Ограниченные таким образом четыре×три ряда, как функции от циклической координаты, составленные по (1) для четырех значений радиусов параллелей, содержат 24 искомым амплитудных коэффициента. Сначала полученные уравнения обрабатывают Фурье анализом по аналогии с (3) где  $k$  изменяют от 0 до 4. Дальнейший расчет величин амплитудных коэффициентов проводят, решая получаемую систему уравнений.

Как уже было замечено, применение в практике экспериментального исследования магнитного поля ТО алгоритмов расчета, построенных только на основе решений систем уравнений ограниченных рядов из (1), сопряжено с низкой достоверностью получаемых результатов для амплитудных коэффициентов гармоник старших степеней. Поэтому при построении новых систем ориентируются на методы с интегральной обработкой данных измерений.

Стремление использовать методы, предполагающие применение измерительных систем с небольшим количеством первичных измерительных преобразователей, обусловлено практическими затруднениями, возникающими при настройке положения и ориентации большого количества датчиков. Как известно положение центра и направление магнитной оси датчика магнитной индукции всегда имеют погрешность при установке.

Наиболее простым вариантом уменьшения количе-

ства датчиков измерительной системы является использование перемещения по одной из угловых координат связанных с исследуемым ТО. Однако создание систем измерения магнитной индукции, позволяющих перемещать ТО поочередно по двум сферическим координатам, также сопряжено с техническими затруднениями и не всегда возможно. Кроме того, поворот исследуемого ТО приводит к изменению индуцированной составляющей его магнитного поля, делая невозможным проведение измерений в присутствии внешнего магнитного поля, например, создаваемым земным магнетизмом, что критично в некоторых случаях. В случае практической необходимости исследования индуцированной составляющей магнитного поля ТО, вместо углового применяют линейное перемещение по оси аппликата, связанной с объектом цилиндрической системы координат. При этом для применения ортогональных свойств функций Лежандра по аналогии с (4) используют специально найденные селективирующие функции  $f_s^k(z)$ , выражение принимает вид:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \int_0^{2\pi} B_r(\rho, \varphi, z) \begin{Bmatrix} \cos k\varphi \\ \sin k\varphi \end{Bmatrix} d\varphi \right] f_s^k(z) dz. \quad (5)$$

Кроме того, в качестве альтернативного варианта, имеющего существенно упрощенный процесс настройки, получили практическое применение системы, построенные на основе тонких (контурных) измерительных обмоток специальной пространственной конфигурации с измеряемой величиной – магнитным потоком.

**Результаты исследований.** Результаты сравнительного анализа существующих методов экспериментального определения амплитудных коэффициентов сферических гармоник с учетом особенностей построения соответствующих измерительных систем можно представить в виде классификации, представленной в табл. 1.

Таблица 1 – Классификация принципов, лежащих в основе методов разделения вкладов и определения величин амплитудных коэффициентов пространственных гармоник при использовании магнито-измерительных систем разных типов

Тип перемещения Измерительная система фиксирует	Линейное	Угловое
	Функциональные зависимости магнитной индукции от координаты перемещения	1. Использование ортогональных свойств функций Лежандра 1.2. Фурье анализ на основе дискретных данных о координатах расположения на окружности точечных датчиков магнитной индукции 2. Использование свойства спада гармоник в ограниченном по их количеству ряде
Функциональные зависимости магнитного потока от координаты перемещения	1. Аппаратно встроенный Фурье анализ, на основе измерительных обмоток специальной пространственной конфигурации 2. Использование ортогональных свойств функций Лежандра	1. Аппаратно встроенный Фурье анализ, на основе измерительных обмоток специальной пространственной конфигурации 2.1. Использование ортогональных свойств функций Лежандра 2.2. Использование свойства спада гармоник в ограниченном по их количеству ряде

Колонки и строки данной таблицы сформированы на основе главных принципов, лежащих в основе работы измерительных систем: измеряемая магнитная величина и тип перемещения исследуемого объекта относительно измерительных датчиков (обмоток) магнитной индукции. В зависимости от комбинации основных принципов работы измерительной системы в ячейках пересечения соответствующего столбца и строки приведены возможные для данной системы методы разделения и определения величин коэффициентов сферических гармоник магнитного поля исследуемого ТО. При этом порядок применения способов разделения и определения вкладов пространственных гармоник во внешнее магнитное поле ТО соответствует первой цифре порядкового номера возле способа. Вторые цифры у номеров способов указывают на наличие альтернативных вариантов соответствующего этапа практического определения величин пространственных гармоник магнитного поля.

Из представленных в табл. 1 способов определения пространственных гармоник магнитного поля следует, что наиболее рациональным порядком применения трех основных способов выделения вкладов гармоник является применение на первом этапе Фурье анализа по циклической координате  $\varphi$ . В результате которого из двойного ряда сферических гармоник согласно (2) будут выделены вклады гармоник только заданного порядка  $m = k$ .

Применение аппаратно встроенного Фурье анализа в системах, измеряющих сигнатуры магнитного потока, сцепленного с обмотками специальной пространственной конфигурации, обусловлено особенностью измерения магнитного потока и является несомненным преимуществом таких систем. Поскольку они принципиально позволяют производить разделение и определение вкладов гармоник существенно (на два три порядка) разнящихся по величине, без существенного влияния на погрешность.

**Выводы.** В результате сравнительного анализа методов экспериментального определения сферических гармоник магнитного поля технических объектов установлены основополагающие принципы их создания. Показана взаимосвязь установленных принципов с существующими измерительными системами для проведения практического сферического гармонического анализа магнитного поля технических объектов. Предложена классификация методов, позволяющая поставить в соответствие друг другу существующие методы и средства экспериментального определения сферических гармоник и служащая теоретической основой создания новых методов и средств проведения практического сферического гармонического анализа магнитного поля технических объектов. В результате анализа предложенной классификации выявлено, что для всех методов, основанных на угловом перемещении по одной оси, характерно наличие методических ограничений на максимальную степень измеряемой сферической гармоники (как правило, не старше четвертой).

#### Список литературы:

1. Bojko D. An advanced technique for the multipole imaging of a magnetic source: discrete transforms in high-precision magnetic signature processing / D. Bojko, A. Kildishev, S. Volokhov // Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest (Cat. No.98CH36254). IEEE: New York, USA, 1998. – P. 260-261.
2. Holmes John J. Theoretical Development of Laboratory Techniques for Magnetic Measurement of Large / John J. Holmes // IEEE Transactions on Magnetics. – 2001. – Vol. 37, № 5. – P. 3790-3797.
3. Гетьман А.В. Определение пространственных гармоник магнитного поля вблизи поверхности технического объекта / А.В. Гетьман // Электричество. – 2005. – № 1. – С. 55-60.
4. Rouve L.L. Application of the spherical harmonic model to identify the magnetic state of a system and to extrapolate its signature / L.L. Rouve, J.P. Bongiraud, P. Le Thiec, J.L. Coulomb // Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 15, Electro-magnetic Nondestructive Evaluation (III), IOS Press, 1999. – P. 136-144.
5. Chadebec O. New method for a fast and easy computation of stray fields created by wound rods / O. Chadebec, L.L. Rouve, J.L. Coulomb // IEEE Transactions on Magnetics. – 2002. – Vol 38. – P. 1005-1010. – ISSN: 0018-9464.
6. Kildishev A.V. Measurement of the Spacecraft Main Magnetic Parameters / A.V. Kildishev, S.A. Volokhov, J.D. Saltykov // IEEE Systems Readiness Technology Conference (AUTOTESTCON'97). – Anaheim (California), 1997. – P. 669-675.
7. ECSS-E-HB-20-07A "Space engineering: Electromagnetic compatibility hand-book" ESA-ESTEC. Requirements & Standards Division. Noordwijk, The Netherlands. – 2012. – 228 p.
8. Гетьман А. В. Определение магнитных мультиполей по сигнатурам поворота источника внутри контурной системы / А.В. Гетьман // Электричество. – 2013. – № 6. – С. 56-61.

#### References (transliterated):

1. Bojko D., Kildishev A., Volokhov S. An advanced technique for the multipole imaging of a magnetic source: discrete transforms in high-precision magnetic signature processing. Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest (Cat. No.98CH36254). IEEE: New York, USA, 1998. P. 260-261.
2. Holmes John J. Theoretical Development of Laboratory Techniques for Magnetic Measurement of Large. IEEE Transactions on Magnetics. 2001. Vol. 37, No. 5. P. 3790-3797.
3. Get'man A.V. Opredelenie prostranstvennykh garmonik magnitnogo polya vblizi poverkhnosti tekhnicheskogo objekta [Determination of the spatial harmonics of the magnetic field near the surface of the technical object]. Elektrichestvo. 2005. No. 1. P. 55-60.
4. Rouve L.L., Bongiraud J.P., Le Thiec P., Coulomb J.L. Application of the spherical harmonic model to identify the magnetic state of a system and to extrapolate its signature. Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 15, Electro-magnetic Nondestructive Evaluation (III), IOS Press, 1999. P. 136-144.
5. Chadebec O., Rouve L.L., Coulomb J.L. New method for a fast and easy computation of stray fields created by wound rods. IEEE Transactions on Magnetics. 2002. Vol. 38. P. 1005-1010. ISSN: 0018-9464.
6. Kildishev A.V., Volokhov S.A., Saltykov J.D. Measurement of the Spacecraft Main Magnetic Parameters. IEEE Systems Readiness Technology Conference (AUTOTESTCON'97). – Anaheim (California). 1997. P. 669-675.
7. ECSS-E-HB-20-07A "Space engineering: Electromagnetic compatibility hand-book" ESA-ESTEC. Requirements & Standards Division. Noordwijk, The Netherlands. 2012. 228 p.
8. Get'man A. V. Opredelenie magnitnykh multipooley po signaturam povorota istochnika vnutri konturnoy sistemy [Determination of magnetic multipoles from the signatures of a source rotation within a contour system]. Elektrichestvo. 2013. No. 6. P. 56-61.

Поступила (received) 19.12.2017

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гетьман Андрій Володимирович (Гетьман Андрей Владимирович, Getman Andriy Volodymyrovych)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ «ХПІ», докторант; тел.: (057) 707-69-61; e-mail: getmanav70@gmail.com.

**Резинкін Олег Лук'янович (Резинкин Олег Лукьянович, Rezinkin Oleg)** – доктор технічних наук, професор, НТУ «ХПІ», завідувач кафедри інженерної електрофізики; тел.: (057) 707-60-52; e-mail: orezynkin@gmail.com.

УДК 621.319.4

**О.Я. ДМИТРИШИН****РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ПЛІВКОВІЙ ДІЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ ЯК СПОСІБ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ІМПУЛЬСНОГО КОНДЕНСАТОРА**

Розглянуто питання визначення напруженості електричного поля в плівковій діелектричній системі, яка може бути використана у якості робочого діелектрика секції високовольтного імпульсного конденсатора. Досліджено вплив напруженості електричного поля на електричну міцність комбінованої плівкової діелектричної системи. Проведено порівняння розрахункових даних з експериментальними, на основі якого зроблені висновки про можливість прогнозування електричної міцності плівкових діелектричних систем.

**Ключові слова:** напруженість електричного поля, плівкова діелектрична система, електрична міцність, секція високовольтного імпульсного конденсатора.

**А.Я. ДМИТРИШИН****РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЛЕНОЧНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КАК СПОСОБ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО КОНДЕНСАТОРА /**

Рассмотрены вопросы определения напряженности электрического поля в пленочной диэлектрической системе, которая может быть использована в качестве рабочего диэлектрика секции высоковольтного импульсного конденсатора. Исследовано влияние напряженности электрического поля на электрическую прочность комбинированной пленочной диэлектрической системы. Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными, на основании которого сделаны выводы о возможности прогнозирования электрической прочности пленочных диэлектрических систем.

**Ключевые слова:** напряженность электрического поля, пленочная диэлектрическая система, электрическая прочность, секция высоковольтного импульсного конденсатора.

**A.YA. DMITRISHIN****CALCULATION OF THE ELECTRIC FIELD IN A FILM DIELECTRIC SYSTEM AS A METHOD FOR PREDICTING THE ELECTRICAL STRENGTH OF A HIGH-VOLTAGE PULSE CAPACITOR /**

The problems of determining the electric field strength in a film dielectric system, which can be used as a working dielectric in the section of a high-voltage pulse capacitor, are considered. The effect of the density of electric field on the electrical strength of a combined film dielectric system is studied. Methods of solution of the Laplace equation and of conformal mappings are used for calculations. Comparison of calculated data with experimental data, on the basis of which conclusions are made about the possibility of predicting the electrical strength of film dielectric systems, is made. It's shown that for combined film dielectric systems of the same qualitative composition, the geometric dimensions and the coefficient of heterogeneity affects the electrical strength more than the distribution of the electric field intensity on the components of this system.

**Keywords:** density of electric field, film dielectric system, dielectric strength, section of high-voltage pulse capacitor.

**Вступ.** Основним фактором, що визначає допустиму величину робочої напруженості електричного поля, та, відповідно, питомі енергетичні характеристики конденсатора й ресурс, є електричне поле в робочому діелектрику секції конденсатора.

Умовно електричне поле в секції можливо розділити на дві області – область «слабкої неоднорідності» (у середині секції) і область «сильної неоднорідності» (на краю обкладок). Більшість робіт по дослідженню електричного поля в конденсаторних конструкціях присвячені дослідженню електричного поля на краю обкладок секції конденсатора та інших крайових задач [1, 2, 3]. Показано, що напруженість електричного поля на краю обкладки впливає на довготривалу електричну міцність конденсатора в цілому. Питання розподілу напруженості електричного поля по компонентам діелектричної системи (в області «слаб-

кої неоднорідності») не приділялося достатньо уваги, але, як показують дослідження, приведені в [4], цей розподіл впливає на короточасну електричну міцність секції конденсатора, а, відповідно, й на надійність конденсатора в цілому.

Крім того, відома залежність середнього ресурса конденсатора  $N_{cp}$ , що очікується, від робочої напруженості електричного поля  $E$  [5]

$$N_{cp} = A_1 \cdot E^{-m}, \quad (1)$$

де  $A_1$  – експериментальна стала для визначеного типу діелектрика;  $m$  – показник ступеня, що залежить від виду діелектричної системи та рівня напруженості електричного поля.

Для широкого класу електричних конденсаторів при робочих напруженостях електричного поля  $E_p$ , близьких до напруженості початкових часткових роз-

© О.Я. Дмитрішин, 2018

рядів  $E_n$ , показник ступеня  $m$  має значення від 4 до 6. Для  $E_p$ , яка змінюється від  $E_n$  до напруженості критичних часткових розрядів  $E'_{кр}$ , значення  $m$  змінюється від 6 до 10. При  $E_p > E'_{кр}$  показник ступеня  $m$  від 10 до 36. При низьких робочих градієнтах (напруженості) електричного поля ( $E_p \approx E_n$ ) пробої робочого діелектрика секції конденсатора відбуваються біля края обкладок. При  $E_p \geq E'_{кр}$  пробої ізоляції розподіляються по площі обкладок секції, в тому числі й біля країв обкладок [6].

Така істотна залежність середнього ресурса, що очікується, від невеликих змін робочих градієнтів електричного поля, згідно формули (1), показує, що дослідження електричного поля в конденсаторних конструк-

ціях є актуальною науковою й практичною задачею.

**Мета** даної роботи – визначення можливості прогнозування електричної міцності секції конденсатора з комбінованою плівковою діелектричною системою за допомогою розрахунку напруженості електричного поля в ній.

**Основна частина.** В якості об'єкта досліджень вибрані комбіновані плівкові діелектричні системи на основі поліпропіленової (ПП) і поліетиленерефталатної (ПЕТ) плівок, що просочені трансформаторним маслом Т-1500, номінальними товщинами  $d_n$  що дорівнюють 30, 34, 35 і 39 мкм. Параметри цих систем приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри комбінованих плівкових діелектричних систем з різною товщиною

$d_n$ , мкм	$d$ , мкм	$d_{пл1}$ , мкм	$d_{\Sigma пл1}$ , мкм	$d_{пл2}$ , мкм	$d_{\Sigma пл2}$ , мкм	$d_{рід}$ , мкм	$d_{\Sigma рід}$ , мкм	$\epsilon_{екв}$	$\epsilon_{пл1}$	$\epsilon_{пл2}$	$\epsilon_{рід}$
30	36,145	10	20	10	10	1,536	6,145	2,965	2,2	3,2	2,2
34	40,964	12	24	10	10	1,741	6,964	2,660			
35	42,169	10	20	15	15	1,792	7,169	2,699			
39	46,988	12	24	15	15	1,997	7,988	2,444			

Примітка.  $\epsilon_{екв}$  – еквівалентна діелектрична проникність діелектричної системи

Такі системи за даними робіт [7, 8] є найбільш придатними для використання в якості робочого діелектрику секцій високовольтних імпульсних конденсаторів.

Тут  $d_{рід}$ ,  $d_{пл1}$ ,  $d_{пл2}$  – товщина шару рідини, шару першої плівки (ПП) і другої плівки (ПЕТ) відповідно;  $\epsilon_{рід}$ ,  $\epsilon_{пл1}$ ,  $\epsilon_{пл2}$  – діелектрична проникність рідини, першої й другої плівки відповідно;  $d_{\Sigma рід}$ ,  $d_{\Sigma пл1}$ ,  $d_{\Sigma пл2}$  – сумарні товщини шарів рідини, першої й другої плівки відповідно.

У роботі [4] показано, що напруженість електричного поля в області «слабкої неоднорідності» може бути визначена методом рішення рівняння Лапласа для двовимірного випадку.

На рис. 1 приведена розрахункова модель тришарової плівкової діелектричної системи.

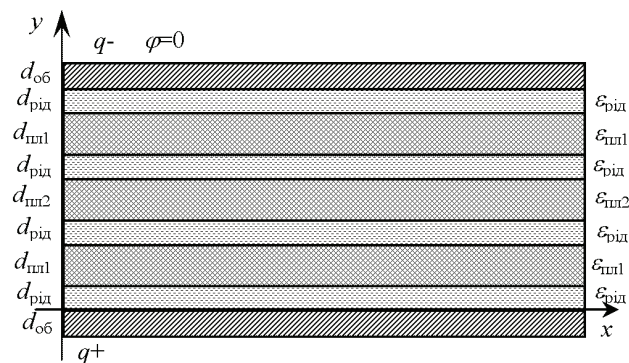


Рисунок 1 – Розрахункова модель тришарової плівкової діелектричної системи

Для діелектричної системи плаского конденсатора рівняння Лапласа для потенціалу електричного поля  $\phi$  залежить від одної змінної по осі ординат  $y$  і виглядає як

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

Рішаючи (2) отримаємо вираз для потенціалу електричного поля

$$\phi = A \cdot y + B, \quad (3)$$

де  $A, B$  – матриці коефіцієнтів.

Напруженість електричного поля

$$E = -grad \phi = -\frac{\partial \phi}{\partial y} = -A. \quad (4)$$

У табл. 2 приведені дані розрахунку напруженості електричного поля в компонентах плівкової діелектричної системи для різних товщин при робочій напрузі  $U_p = 6$  кВ.

Аналізуючи дані табл. 2, можна відмітити, що у системи товщиною 30 мкм напруженість електричного поля в рідкому діелектрику (найбільш електрично слабкому компоненті) максимальна, а у системи товщиною 39 мкм – мінімальна. Можливо припустити, що й електрична міцність у цих систем буде збільшуватися з ростом товщини.

Таблиця 2 – Дані розрахунку напруженості електричного поля в компонентах плівкової діелектричної системи для різних товщин

$d_n$ , мкм	$E_{пл1}$ , кВ/мм	$E_{пл2}$ , кВ/мм	$E_{рід}$ , кВ/мм
30	218,91	150,50	218,91
34	191,07	131,36	191,07
35	188,42	129,54	188,42
39	170,91	117,50	170,91

У роботі [9] одержано вираз для визначення коефіцієнту неоднорідності електричного поля для трьохкомпонентної діелектричної системи.

$$K_{но} = \left[ \frac{d_{\Sigma ж} + \epsilon_{ж} \cdot \frac{d_{\Sigma н1}}{d} + \epsilon_{ж} \cdot \frac{d_{\Sigma н2}}{d}}{d} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Цей коефіцієнт характеризує викривлення коефіцієнту посилення електричного поля, тобто відношення напруженості електричного поля в конкретній точці до початкової напруженості  $E_0 = U_0/d_n$ , де  $U_0$  – прикладена до обкладок конденсатора напруга.

У роботі [10] представлена методика розрахунку «напруженого об'єму»  $V_n$ , для плівкових діелектричних систем, який, згідно [3] зворотно пропорційний ресурсу конденсатора (довгочасній електричній міцності).

В таблиці 3 приведено результати розрахунку коефіцієнта неоднорідності, критичної напруженості  $E_{кр}$ , «напруженого об'єму» і радіусу області з підвищеною напруженістю  $r_n$  для обраних діелектричних систем при початковій напруженості електричного поля  $E_0 = 100$  кВ/мм.

Таблиця 3 – Дані розрахунку для обраних діелектричних систем

$d_n$ , мкм	$K_{н\partial}$	$E_{кр}$ , кВ/мм	$V_n$ , мм <sup>3</sup>	$r_n$ , мкм
30	0,909	411,4	0,202	19,00
34	0,899	407,3	0,261	21,61
35	0,934	421,8	0,270	21,99
39	0,929	419,7	0,336	24,54

Аналізуючи дані, які приведені в таблиці 3 можна відмітити, що у системи товщиною 34 мкм коефіцієнт неоднорідності менше, ніж у системи товщиною 30 мкм, тобто у системи товщиною 34 мкм можна припустити більшу короточасну електричну міцність. Що стосується «напруженого об'єму»  $V_n$  і радіусу області з підвищеною напруженістю  $r_n$ , то видно, що зі збільшенням товщини вони збільшуються, і, відповідно, ресурс буде зменшуватися.

На рис. 2 приведена залежність напруженості електричного поля  $E$  від відстані  $r$  до гострого краю обкладки й товщини діелектрика  $d$  при напрузі на обкладках 6 кВ.

Електричне поле може характеризуватися таким параметром як коефіцієнт посилення електричного поля, що дорівнює відношенню напруженості електричного поля  $E$  до напруженості  $E_0$  однорідного електричного поля.

$$E = K_n \cdot E_0, \tag{6}$$

де  $K_n$  – коефіцієнт посилення електричного поля.

$$K_n = K_{н\partial} \cdot K_0, \tag{7}$$

де  $K_0$  – коефіцієнт посилення однорідного електричного поля.

Вираз для  $K_0$  отримано в роботі [2] методом конформних відображень.

$$K_0 = \sqrt[3]{\frac{d}{\pi \cdot a_n \cdot k_T}} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{r}}, \tag{8}$$

де  $k_T$  – поправочний коефіцієнт [2],  $k_T = 1,5$ ;  $a_n$  – геометричний коефіцієнт;

$$a_n = \sqrt{1 - (1/(1 + \frac{1}{2} \cdot n))^2}, \tag{9}$$

де  $n$  – відношення товщини обкладки  $d_{об}$  до товщини діелектрика  $d$ .

Аналізуючи зазначену на рис. 2 залежність можна відзначити, що напруженість електричного поля поблизу краю обкладки у діелектричній системі товщиною 39 мкм вище, ніж у системи товщиною 30 мкм. Отже, очікуваний ресурс діелектричної системи меншою за товщиною буде вище, незважаючи на більш високе значення напруженості електричного поля в рідині в області «слабкої неоднорідності», в залежності від коефіцієнта запасу по електричній міцності.

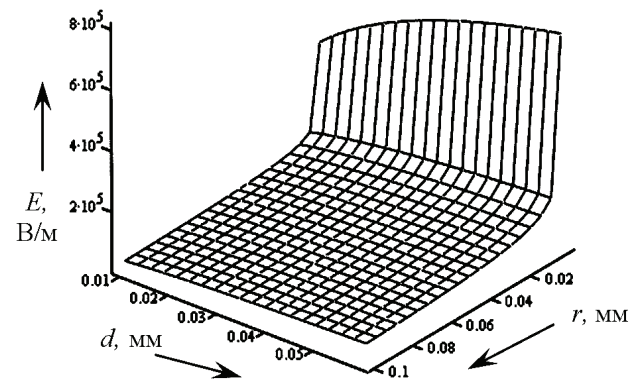


Рисунок 2 – Залежність напруженості електричного поля від відстані  $r$  до гострого краю обкладки й товщини діелектрика

У табл. 4 наведені експериментальні дані по визначенню пробивної напруженості  $E_{пр}$  (короточасної електричної міцності) для досліджуваних систем [7].

Таблиця 4 – Середні значення пробивної напруженості електричного поля для обраних систем

$d$ , мкм	30	34	35	39
$E_{пр}$ , кВ/мм	420,0	423,5	402,9	379,5

Дані табл. 4 підтверджують отримані теоретично припущення, висловлені на підставі розрахунку коефіцієнта неоднорідності. Що стосується значень напруженості електричного поля в компонентах діелектрика (див. табл. 2), а саме - зменшення електричної міцності зі збільшенням напруженості в рідкому діелектрику, не підтвердилося, хоча для плівкових діелектричних систем з різним складом в роботі [4] дане припущення підтверджується. Це свідчить про те, що в комбінованих діелектричних системах фактор впливу розподілу напруженості електричного поля не домінує над фактором неоднорідності системи.

У табл. 5 наведені експериментальні дані по визначенню середнього ресурсу  $N_{ср}$ , що очікується (довгочасної електричної міцності) для досліджуваних систем, при напруженості електричного поля  $E_0 = 150$  кВ/мм [8].

Таблиця 5 – Середні значення ресурсу для обраних систем

$d$ , мкм	30	34	35	39
$N_{ср}$ , зарядів-розрядів	$1,39 \cdot 10^7$	$1,42 \cdot 10^6$	$1,33 \cdot 10^6$	$3,71 \cdot 10^5$

Дані у табл. 5 підтверджують дані розрахунку в табл. 3, тобто у діелектричних систем з меншим «напруженим об'ємом» ресурс вище.



**Висновки.** Прогнозування електричної міцності комбінованих плівкових діелектричних систем за допомогою методів розрахунку напруженості електричного поля достовірно, що підтверджується експериментальними даними. Для комбінованих плівкових діелектричних систем одного якісного складу геометричні розміри і коефіцієнт неоднорідності впливає на електричну міцність більше, ніж розподіл напруженості електричного поля по компонентах цієї системи.

#### Список літератури:

1. Рудаков В.В. Распределение электрического поля у края обкладки конденсатора с комбинированным диэлектриком. / В.В. Рудаков // Вестник ХГПУ. – 1998. – № 25. – С. 12-16.
2. Титов М.Н. Расчет электрического поля на краю секции конденсатора / М.Н. Титов // Электричество. – 1979. – № 11. – С. 56-58.
3. Рудаков В.В. Срок службы кабельной изоляции как функция «напряженного объема» / В.В. Рудаков // Техническая электродинамика. – 1998. – № 5. – С. 8-10.
4. Дмитришин А.Я. Прогнозирование надежности секции высоковольтного импульсного конденсатора с неоднородным пленочным диэлектриком с помощью метода решения уравнения Лапласа / А.Я. Дмитришин, А.А. Щерба // Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность». – 2009. – № 4. – С. 8-10.
5. Конотоп В.В. Основы проектирования высоковольтных импульсных устройств / В. В. Конотоп. – Харьков: ХПИ, 1973. – 144 с.
6. Рудаков В.В. Сильні електричні поля в конденсаторних конструкціях та удосконалення високовольтних силових конденсаторів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.09.13 «Техніка сильних електричних та магнітних полів» / В.В. Рудаков. – Х.: 1999. – 35 с.
7. Gun'ko V.I. Investigations of the constructions of film dielectrics for high-voltage pulse capacitors / V.I. Gun'ko, A.Ya. Dmitrishin, L.I. Onishchenko, S.O. Toporov, T.A. Feshchuk // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2012. – Vol. 48, № 2. – P. 167-169.
8. 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.
9. Дмитришин А.Я. Определение коэффициента неоднородности пленочной диэлектрической системы секции высоковольтного импульсного конденсатора / А.Я. Дмитришин // Материалы XV Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». – Николаев, 2011. – С. 205-208.
10. Дмитришин А.Я. Определение «напряженного объема» для пленочных диэлектрических систем высоковольтных конденсаторов / А.Я. Дмитришин // Сборник научных трудов НУК. – 2010. – № 4. – С. 125-129.

#### References (transliterated):

1. Rudakov V.V. Raspredelenie elektricheskogo polya u krauya obkladki kondensatora s kombinirovannyim dielektrikom [The distribution of the electric field at the edge of the capacitor

- plate with a combined dielectric]. Vestnik KhGPU [Bulletin of the National Technical University «KhPI»], 1998. Vol. 25. P. 12-16.
2. Titov M.N. Raschet elektricheskogo polya na krauyu sektsii kondensatora [Calculation of the electric field at the edge of the capacitor section]. Elektrichestvo [Electricity], 1979. No. 11. P. 56-58.
  3. Rudakov V.V. Srok sluzhby kabelnoj izolyatsii kak funktsiya «napryazhonnogo ob'yoma» [The lifetime of cable insulation as a function of "stressed volume"]. Tehnicheskaya elektrodinamika [Technical electrodynamics], 1998. No. 5. P. 8-10.
  4. Dmitrishin A.Ya., Scherba A.A. Prognozirovanie nadezhnosti sektsii vyisokovoltного impulsного конденсатора s neodnorodnym plenochnym dielektrikom s pomoschyu metoda resheniya uravneniya Laplasa [Forecasting the reliability of a section of a high-voltage pulse capacitor with an inhomogeneous film dielectric using the method of solving the Laplace equation]. Tehnichna Elektrodinamika. Tematichnyj vypusk «Sylova elektronika ta energoefektyvnist» [Technical electrodynamics. Special issue «Power Electronics and Energy Efficiency»], 2009. No. 4. P. 68-71.
  5. Konotop V.V. Osnovy proektirovaniya vyisokovoltnykh impulsnykh ustroystv [Fundamentals of designing high-voltage impulse devices]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 1973. 144 p.
  6. Rudakov V.V. Sylni elektrichni polya v kondensatornih konstruksiyah ta udoskonalennya visokovoltnykh silovykh kondensatoriv: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya d-ra tehn. nauk: spets. 05.09.13. [Strong electric fields arising in the capacitor structures and improvement of the high-voltage high-power capacitors: thesis for the doctor's degree of technical sciences, speciality 05.09.13 – strong electrical and magnetic fields engineering].
  7. Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ya., Onishchenko L.I., Toporov S.O., Feshchuk T.A. Investigations of the constructions of film dielectrics for high-voltage pulse capacitors. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2012. Vol. 48, no. 2. P. 167-169.
  8. Dmitrishin A.Ya., Grebennikov I.Yu., Toporov S.O., Slepets E.N. Otsenka dlitelnoj elektricheskoy prochnosti razlichnykh konstruksij plenochного dielektrika dlya vyisokovoltnykh impulsnykh kondensatorov [Evaluation of the long-term electrical strength of various film dielectric structures for high-voltage impulse capacitors]. Elektronaya obrabotka materialov [Surface Engineering and Applied Electrochemistry], 2014. No. 5. P. 92-94.
  9. Dmitrishin A.Ya. Opredelenie koeffitsienta neodnorodnosti plenochной dielektricheskoy sistemy sektsii vyisokovoltного impulsного конденсатора [Determination of the inhomogeneity coefficient of the film dielectric system of the high-voltage pulse capacitor section]. Materialy XV Mezhdunarodnoj shkoly-seminara «Fizika impulsnykh razrjadov v kondensirovannykh sredah» [Proc. of the XV Int. Conf. "Physics of Pulse Discharges in Condensed Media"] Nikolaev, 2011. P. 205-209.
  10. Dmitrishin, A.Ya. Opredelenie «napryazhennogo ob'yoma» dlya plenochnykh dielektricheskikh sistem vyisokovoltnykh kondensatorov [The definition of "stressed volume" for film dielectric systems of high-voltage capacitors]. Zbirnyk naukovykh prats NUK [Bulletin of the National Shipbuilding University], 2010. No. 4. P. 125-129.

Надійшла (received) 07.03.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Дмитрішин Олексій Ярославович (Дмитрішин Алексей Ярославович, Dmitrishin Aleksey Yaroslavovich)** – молодший науковий співробітник, ІІІТ НАН України, м. Миколаїв; тел.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iipr.com.ua.

УДК 621.316.99

*Г.М. КОЛИУШКО, А.В. ПЛИЧКО, Е.Г. ПОНУЖДАЕВА***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «КДЗ-1У» ДЛЯ ОЦЕНКИ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ЭНЕРГООБЪЕКТА**

Описана методика измерения напряжения прикосновения с использованием измерительного комплекса «КДЗ-1У». Описана конструкция применяемых струбцин и преимущества их использования. Изображены схемы соединения оборудования для определения напряжения прикосновения на территории электроустановки и для измерения переходного сопротивления потенциального электрода. Представлена последовательность действий при измерениях параметров в контрольных точках энергообъекта. Приведен образец документальной фиксации основных и дополнительных параметров для оценки адекватности математической модели заземляющего устройства.

**Ключевые слова:** заземляющее устройство, напряжение прикосновения, измерительный комплекс «КДЗ-1У», диагностика состояния заземляющих устройств, режим короткого замыкания, сопротивления контактного соединения, адекватность математической модели.

*Г.М. КОЛИУШКО, А.В. ПЛИЧКО, Е.Г. ПОНУЖДАЕВА***ВИКОРИСТАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ «КДЗ-1У» ДЛЯ ОЦІНКИ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ЕНЕРГООБ'ЄКТУ**

Описано методику вимірювання напруги дотику з використанням вимірювального комплексу «КДЗ-1У». Описано конструкцію застосованих струбцин та переваги їх використання. Зображено схеми з'єднання обладнання для визначення напруги дотику на території електроустановки та для вимірювання перехідного опору потенціального електроду. Представлено послідовність дій при вимірюванні параметрів у контрольних точках энергооб'єкта. Наведено зразок документальної фіксації основних та додаткових параметрів для оцінки адекватності математичної моделі заземлювального пристрою.

**Ключові слова:** заземлювальний пристрій, напруга дотику, вимірювальний комплекс «КДЗ-1У», діагностика стану заземлювального пристрою, режим короткого замикання, опір контактного з'єднання, адекватність математичної моделі.

*G.M. KOLIUSHKO, A.V. PLICHKO, H. G. PONUZHDAYEVA***MEASUREMENT SYSTEM «KDZ-1U» USAGE IN ESTIMATING MATHEMATICAL MODEL'S ADEQUACY OF POWER EQUIPMENT'S GROUNDING CONNECTION**

The description of measurement procedure of contact voltage on the power equipment's control points using measuring system "KDZ-1U", is the main goal of the project. The procedure is based on physical's trials theory, ampere-voltmeter's method and electromagnetic field theory. This procedure permits to obtain needed parameters for estimating mathematical model's adequacy of power equipment's grounding connection. Provided ground clamps' design, and their features were described. Contact voltage measuring circuit on the actual power installation's territory and transition resistance of polarizing electrode measurement schemes were shown. Operating procedure during parameter measurement of power equipment's control points was represented. The prototype of documental recording of main and additional parameters for estimating mathematical model's adequacy of grounding connection was provided.

**Keywords:** grounding grid system, contact voltage, measuring system "KDZ-1U", grounding connection's state diagnostic; short circuit conditions, contact joint resistance, mathematical model's adequacy.

**Введение.** Повышение безопасности работы обслуживающего персонала на электроустановках является весьма актуальной задачей. Основным требованием к проектированию электроустановок, сформулированным в правилах ПУЭ [1], является недоступность для случайного прямого прикосновения персоналом к токоведущим частям и отсутствие опасного напряжения на доступных для прикосновения проводящих частях.

Специалистами НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» разработан и введен в Государственный реестр средств измерительной техники, допущенных к применению в Украине, уникальный комплекс оборудования, с помощью которого можно провести полную диагностику заземляющих устройств (ЗУ), в том числе

установить наличие связей электроустановок с ЗУ, указать, каким образом будет растекаться ток короткого замыкания (КЗ) по металлоконструкциям, определить напряжения прикосновения при моделировании КЗ.

С использованием этого комплекса оборудования сотрудники института провели диагностику ЗУ более 1000 объектов, в числе которых четыре ныне действующие АЭС, магистральные подстанции класса напряжения 220-750 кВ, тепло- и гидроэлектростанции, подстанции 35 – 110 (150) кВ областных энергетических компаний, нефтеперекачивающие станции, промышленные и административные здания, а также объекты связи.

Анализ результатов диагностики позволяет сде-

лать вывод о том, что информация о конструктивном исполнении ЗУ зачастую недостоверна из-за отступления от проекта на стадии монтажа ЗУ, замены оборудования или реконструкции объекта без учета реальной схемы ЗУ, коррозии металла, из которого выполнены элементы ЗУ.

Электроустановки, созданные более 30 лет назад, когда токи КЗ не превышали 3-5 кА, спроектированы согласно нормативным требованиям к допустимому значению сопротивления ЗУ. Поэтому на этих объектах достаточно было контролировать сопротивление ЗУ.

В настоящее время с ростом мощностей энергосистем токи КЗ возросли до значений, равных нескольким десяткам кА. Это привело к повышению значений напряжения прикосновения ( $U_{\text{прик.}}$ ) электроустановок при КЗ до величин, опасных для обслуживающего персонала, при этом сопротивление ЗУ могло не превышать допустимого значения (0,5 Ом). В нормативных документах [1, 2] существуют два направления проектирования ЗУ для электроустановок напряжением более 1 кВ в электрических сетях с глухозаземленной нейтралью: по допустимому значению  $U_{\text{прик.}}$  и по допустимому значению сопротивления ЗУ. Приведенный в [3] статистический анализ количества превышений допустимых значений нормируемых параметров ЗУ действующих подстанций свидетельствует о том, что обеспечение допустимого значения сопротивления ЗУ не гарантирует безопасность обслуживающего персонала установки.

Таким образом, для этих целей наиболее актуальным становится контроль  $U_{\text{прик.}}$ .

Определение  $U_{\text{прик.}}$  является одним из этапов контроля технического состояния ЗУ электроустановок, периодичность и порядок которого регламентируется действующим нормативным документом [2].

**Существующие методы решения задачи.** Проверка конструктивного исполнения ЗУ и измерение напряжения прикосновения без вскрытия грунта производится в соответствии с требованиями [2] с использованием измерительного комплекса «КДЗ-1У» [4], внешний вид которого изображен на рис. 1. Комплекс состоит из генератора синусоидального тока ГСТ-3 (поз. 1), измерителя напряжения и индикатора напряженности магнитного поля ИМПН-3 (поз. 2).

Комплекс генерирует переменный ток и напряжение заданной частоты, измеряет их квадратичные значения и определяет наличие магнитного поля, иницированного током, на объекте испытаний.

Измерение  $U_{\text{прик.}}$  и приведение его к реальным значениям токов КЗ является трудоемкой задачей. Это связано с трудностями соблюдения методических условий проведения таких измерений. Например, при измерениях  $U_{\text{прик.}}$  используется вспомогательный токовый электрод, который необходимо размещать на расстоянии  $(1,5 \div 3)D$ , где  $D$  – наибольший размер ЗУ, в местах, свободных от опор воздушных линий и подземных металлических конструкций, связанных с ЗУ объекта. Для получения достоверных результатов необходимо производить измерения для каждого за-

земляемого оборудования. При небольших размерах районных подстанций (площадью около 1 га) можно измерить значение  $U_{\text{прик.}}$  при имитации КЗ на всем обслуживаемом оборудовании, так как его количество невелико. Кроме того, недостатком такой методики является невозможность учесть нелинейную зависимость  $U_{\text{прик.}}$  от величины тока КЗ.

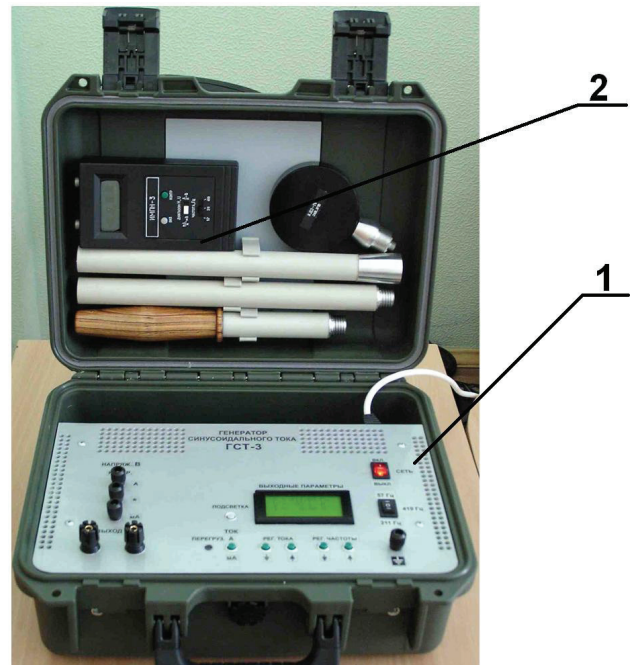


Рисунок 1 – Измерительный комплекс для диагностики состояния заземляющих устройств «КДЗ-1У»:

1 – генератор синусоидального тока ГСТ-3; 2 – измеритель напряжения и индикатор напряженности магнитного поля ИМПН-3

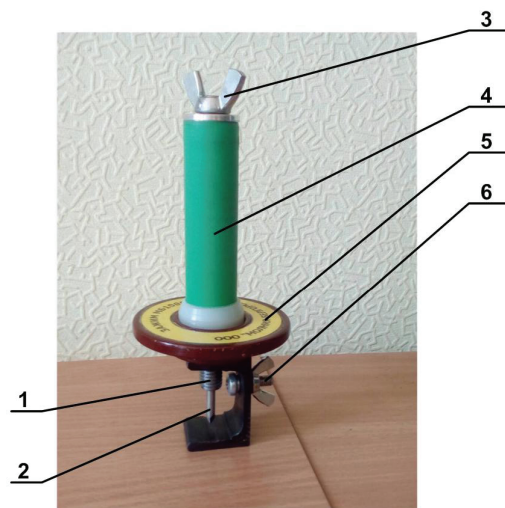


Рисунок 2 – Внешний вид струбины:

1 – контактная часть штока; 2 – наконечник; 3 – рукоятка; 4 – труба; 5 – упор; 6 – контактный винт

При этом, существует значительное количество районных подстанций (площадью в несколько га) с большим количеством обслуживаемого оборудования (не говоря уже о магистральных подстанциях), на которых измерение  $U_{\text{прик.}}$  при имитации КЗ произвести

невозможно в связи с большими размерами ЗУ, невозможностью выноса измерительных элементов из-за отсутствия свободного места в условиях плотной застройки. В этих случаях целесообразно произвести измерения на нескольких (не менее шести) единицах обслуживаемого оборудования по упрощенной схеме, а затем при помощи математического моделирования определить  $U_{\text{прик}}$  на остальном оборудовании. Разработанный расчетно-экспериментальный метод заключается в создании математической модели ЗУ подстанции и проверке ее адекватности реальным условиям путем сравнения расчетных данных с экспериментальными значениями  $U_{\text{прик}}$  в контрольных точках при имитации однофазного КЗ на территории объекта.

Для осуществления этих действий при обследовании ЗУ подстанции определяют схему расположения ЗУ с установленным оборудованием, площадь сечения заземлителя, электрофизические характеристики грунта (число слоев, удельное сопротивление и толщину каждого слоя), а также дополнительные параметры для оценки адекватности математической модели ЗУ.

**Целью работы** является описание методики измерения  $U_{\text{прик}}$  на оборудовании в контрольных точках, а также определение дополнительных параметров при имитации КЗ для дальнейшего сравнения измеренных значений со значениями, полученными в результате математического моделирования.

**Описание методики.** Специалистами НИПКИ «Молния» разработана методика, определяющая порядок проведения исследовательских испытаний и их документальную регистрацию при диагностике ЗУ электроустановок. В ней описана последовательность действий при снятии характеристик для определения  $U_{\text{прик}}$  на территории электроустановок, четкое соблюдение которой является необходимым условием для выполнения поставленной задачи.

На экспериментальное определение напряжения прикосновения влияет ряд факторов, описанных в [5-7], электромагнитные помехи промышленной частоты, распределение тока замыкания на землю по нейтралям силовых трансформаторов, горизонтальная неоднородность плотности верхнего слоя грунта в зоне обслуживания, частота измерительного тока, сопротивление связи между заземляемой конструкцией и заземляющим проводником. Из практики проведения диагностики известно, что в случае не учета рассмотренных факторов суммарная погрешность определения величины  $U_{\text{прик}}$  достаточно велика.

При измерениях  $U_{\text{прик}}$  в контрольных точках очень важно осуществлять качественный контакт подсоединение проводов к элементам обследуемого объекта, чтобы уменьшить сопротивление связи между ними. Для проведения испытаний была разработана трубка, внешний вид которой представлен на рис. 2.

Конструкция трубки позволяет регулировать силу прижима контактной части штока 1, к элементам заземления. Сам шток, представляет собой винт, со-

стоящий из контактной части, заостренный наконечник 2 которой выполнен из легированной стали, и рукоятки 3. Контактную часть и рукоятку разделяет изолирующая вставка. Шток размещен в изоляционной трубе 4, на которой закреплен упор 5, препятствующий возможности прикосновения обслуживающего персонала к элементам заземления, находящимся под напряжением. Соединительные провода закрепляются на трубине контактным винтом 6.

Экспериментальные исследования с применением трубки показали, что от покрытия заземляющего спуска, силы закручивания и степени изношенности трубки зависят переходные сопротивления соединений, что влияет на результат измерения  $U_{\text{прик}}$ .

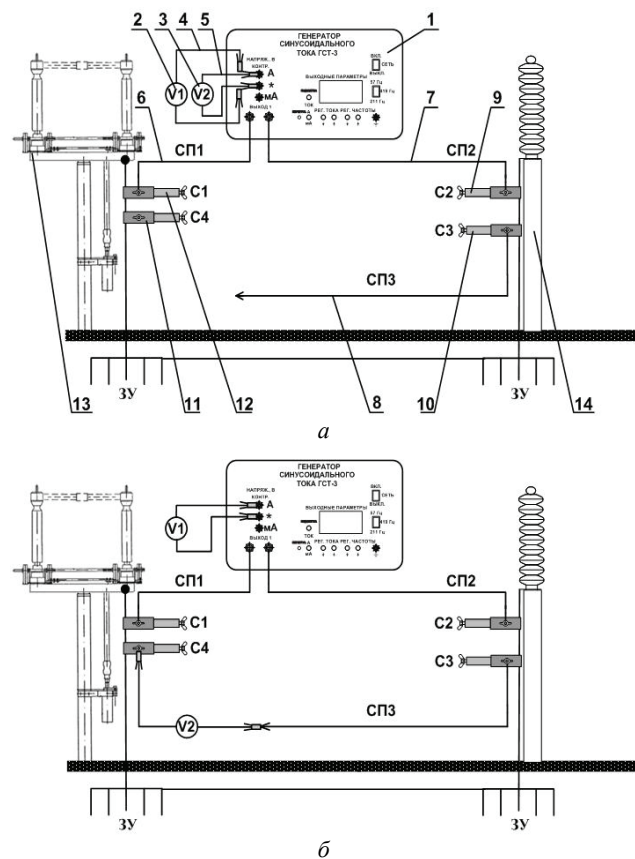


Рисунок 3 – Схема измерений с использованием «КДЗ-1У»: а – измерение напряжения на шунте  $U_{\text{ш}}$  [А] для определения тока; б – измерение падения напряжения на ЗУ ( $U_{3y}$ ); 1 – генератор синусоидального тока ГСТ-3; 2 – измеритель напряжения и индикатор напряженности магнитного поля V1 (ИМПН-3 №1); 3 – измеритель напряжения и индикатор напряженности магнитного поля V2 (ИМПН-3 №2); 4 – провод измерительный №1; 5 – провод измерительный №2; 6 – провод соединительный СП1; 7 – провод соединительный СП2; 8 – провод соединительный СП3; 9 – трубка C1; 10 – трубка C2; 11 – трубка C3; 12 – трубка C4; 13 – объект, на котором производятся измерения; 14 – объект, относительно которого производятся измерения

Для более точного измерения  $U_{\text{прик}}$  следует соблюдать нижеприведенные рекомендации:

– при испытаниях производить измерения по методу амперметра-вольтметра, пользуясь схемами соединения оборудования согласно рис. 3, 4;

– при измерениях малых значений  $U_{\text{прик.}}$  подключить струбцину к заземляющему спуску у самой земли;  
 – в качестве объекта, относительно которого производятся измерения, лучше всего использовать опорный изолятор, имеющий один заземляющий спуск и у которого нет связи с ЗУ по кабелям и металлоконструкциям.

В начале проведения испытаний нужно собрать схему, представленную, на рис. 3, а, для настройки и проверки измерительного комплекса «КДЗ-1У». Для этого понадобится следующее оборудование: комплекс «КДЗ-1У», струбцины – 4 шт., соединительные провода – 4 шт., дополнительно ИМПН-3 (измерительные провода входят в комплект ИМПН-3).

Одну клемму Выход 1 генератора ГСТ-3 (рис. 3, а, поз. 1) соединяем при помощи соединительного провода СП1 (поз. 6) и струбцины С1 (поз. 12) с заземляющим проводником объекта 13, вторую – при помощи СП2 (поз. 7) и струбцины С2 (поз. 9) с заземляющим проводником объекта 14. Струбцину С3 (поз. 8) и соединительный провод СП3 (поз. 9) соединяем с заземляющим проводником объекта (поз. 14). Согласно п. 3.3.2 руководства по эксплуатации подготовим комплекс КДЗ-1 к работе. Установим на генераторе ГСТ-3 переключатель выбора частоты в положение 57 Гц, а кнопку ТОК в положение А. Включим генератор, подсоединив сетевой шнур к сети питания и переключив выключатель СЕТЬ в положение ВКЛ. Установив на измерителях V1 и V2 (поз. 2, 3) переключатель ЧАСТОТА, Гц в положение 57 Гц, а переключатель ДИАПАЗОН, Н, U – в положение мА/мВ, подсоединим к разъему U измерительные провода №1 и №2 (поз. 4, 5). Включим V1 и V2 кнопками ВКЛ., произведем настройку генератора на выбранную частоту работы измерителей, для этого кнопками РЕГ. ЧАСТОТЫ ↓ и ↑ установим значение, соответствующее максимальным показаниям регистратора при работе на заданной частоте. Исходя из практического опыта с целью уменьшения влияния помех и для удобства дальнейшего расчета целесообразно на генераторе кнопками РЕГ. ТОКА ↓ и ↑ установить значение тока ~ 4,5 А. Заполним табл. 1 (значения сопротивления шунтов  $R_{\text{ш [A]}}$  и  $R_{\text{ш [mA]}}$  – постоянные величины, указанные в руководстве по эксплуатации на комплекс, значение напряжения на шунте  $U_{\text{ш [A]}}$  соответствует показаниям измерителя V1).

Таблица 1 – Параметры измерения напряжения прикосновения

Наименование оборудования, на котором измеряется напряжение прикосновения	Параметры измерения напряжения прикосновения				Параметры измерения сопротивления пластины				Оборудование, относительно которого измеряется напряжение прикосновения
	$U_{\text{ш [A]}}$ МВ	$U_{\text{зУ}}$ МВ	$U_{\text{ш [A]}}$ МВ	$U_{\text{ш [mA]}}$ МВ	$U_{\text{ш [A]}}$ МВ	$U_{\text{ш [mA]}}$ МВ	$R_{\text{ш [A]}}$ В	$R_{\text{ш [mA]}}$ Ом	
*****	***	***	***	***	***	***	***	***	

Для измерения падение напряжения на ЗУ ( $U_{\text{зУ}}$ ) между объектами (рис. 3, поз. 13, 14), соединим измеритель V2 со струбциной С4 (поз. 11, рис. 3, а) и с соединительным проводом СП3 согласно рис. 3, б.

Зафиксируем показания измерителя V2 и занесем его в колонку  $U_{\text{зУ}}$  в табл. 1. Для измерения напряжения прикосновения  $U_{\text{прик.}}$  на испытываемом объекте соберем схему, изображенную на рис. 4.

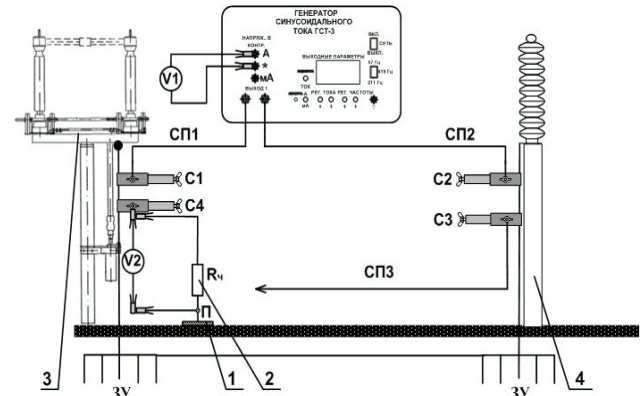


Рисунок 4 – Схема измерения  $U_{\text{прик.}}$  на территории электроустановки:

- 1 – вспомогательный потенциальный электрод (пластина П);
- 2 –  $R_{\text{ч}} = 1\text{кОм}$ , резистор, имитирующий сопротивление тела человека, 3 – объект, на котором производится измерения;
- 4 – объект, относительно которого производится измерения

В качестве вспомогательного потенциального электрода (в дальнейшем пластина), используется латунная пластина 250 x 250 мм, толщиной 0,8-1 мм, закрепленная на листе фанеры, имитирующая стопы ног человека. Установим пластину 1 (рис. 4) с грузом не менее 50 кг на расстоянии 0,8 м от заземляющего проводника объекта 3, предварительно выровняв и увлажнив грунт в месте установки в целях имитации наихудших условий.

Подсоединим зажимы измерительных проводов измерителя V2 к струбцине С4 и к пластине 1. Сопротивление  $R_{\text{ч}}$ , имитирующее сопротивление человека и равное 1 кОм (поз. 2), подсоединим к струбцине С4 согласно рис. 4. Зафиксируем показание измерителя V2, соответствующее  $U_{\text{прик.}}$ , которое следует занести в табл. 1. Для определения напряжения помехи  $U_{\text{помехи}}$  нужно установить на генераторе переключатель СЕТЬ в положение ВЫКЛ., и, не изменяя схемы измерения, зафиксировать по показаниям измерителя V2 значение  $U_{\text{помехи}}$ , занести его табл. 1. При больших значениях  $U_{\text{помехи}}$  ( $U_{\text{прик.}} / U_{\text{помехи}} < 3$ ) необходимо скорректировать измеренное значение напряжения прикосновения, пользуясь формулой:  $U'_{\text{прик.}} = K_{\text{помехи}} \times U_{\text{прик.}}$ , где  $K_{\text{помехи}}$  – коэффициент, определяемый по графику, представленному на рис. 5.

Собрав схему см. рис. 6, определим переходное сопротивление пластины  $R_{\text{пласт.}}$  при КЗ. Для этого установим на измерителе V2 переключатель ДИА-

ПАЗОН Н, U – в положение А/м, В, отсоединим соединительный провод СП1 от струбины С1 и подсоединим его при помощи зажима к пластине. Сопротивление  $R_4$  отсоединим от струбины С4, а зажимы измерительных проводов измерителя V1 подсоединим к клеммам КОНТРОЛЬ (мА) и (\*) генератора ГСТ-3. Включим генератор, установим кнопку ТОК в положение мА. Кнопкой РЕГ. ТОКА ↑ установим на генераторе максимальную величину тока. В табл. 1 занесем значения напряжения пластины  $U_{\text{пласт}}$  (по показаниям измерителя V2) и значение напряжения шунта  $U_{\text{ш}} [\text{мА}]$  (по показаниям измерителя V1). Имея значения  $U_{\text{пласт}}$  и  $U_{\text{ш}} [\text{мА}]$ , определим значение  $R_{\text{пласт}}$ , пользуясь формулами, приведенными в табл. 1.

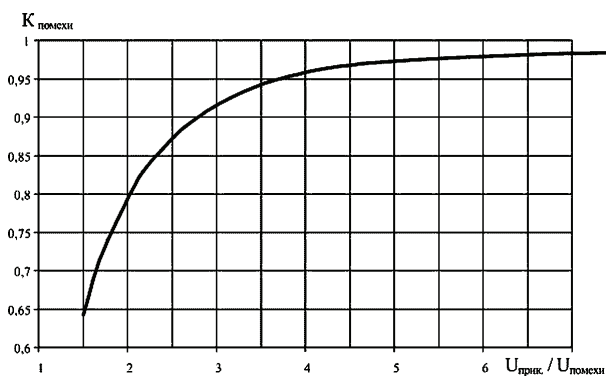


Рисунок 5 – График для определения коэффициента помехи промышленной частоты  $K_{\text{помехи}}$ .

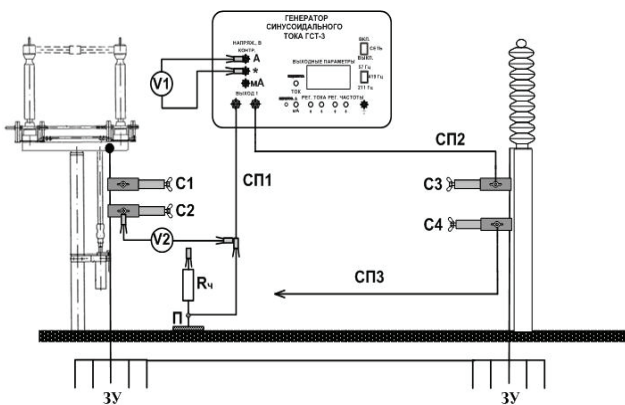


Рисунок 6 – Схема измерения переходного сопротивления  $R_{\text{пласт}}$ .

В дальнейшем нужно произвести аналогичные измерения для всех исследуемых единиц оборудования (не менее шести) и занести их в табл. 1.

Для численного моделирования аварийных режимов работы ЗУ с сеткой произвольной конфигурации была разработана программа «GROUND 1.0» [8], с использованием которой, проводятся расчеты значений  $U_{\text{прик}}$  при КЗ на территории подстанции, и анализируется реакция ЗУ в аварийных режимах. Исходными данными для расчета являются реальная схема подстанции, координаты узлов и порядок их соедине-

ния, глубина залегания и площадь сечения заземлителей, а также величина тока КЗ, удельное электрическое сопротивление грунта, удельное сопротивление материала, из которого изготовлен заземлитель. Чем крупнее ЗУ объекта, чем больше оборудования на нем установлено, тем больше количество соединений, тем сложнее и продолжительнее расчет [9].

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными позволяет оценить соответствие математической модели реальным условиям. После чего выполняется математическое моделирование аварийных режимов по всей территории подстанции при реальном значении тока КЗ для определения значения  $U_{\text{прик.}}$ . По результатам расчетно-экспериментального метода выдаются рекомендации, необходимые для приведения ЗУ энергообъекта в соответствие с требованиями существующих нормативных документов.

### Выводы

Использование описанной в статье методики измерений позволяет определить параметры, необходимые для оценки адекватности математической модели ЗУ, что важно для получения достоверных значений напряжения прикосновения на электроустановках.

Использование расчетно-экспериментального метода и приведенной в статье методики уменьшает временные и ресурсные затраты при обследовании ЗУ подстанции и его ремонте.

### Список литературы:

1. Правила улаштування електроустановок. [Чинне від 20.11.2014]. – Х.: Міненерговугілля України, 2014. – 793 с. – (Національний стандарт України).
2. 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).
3. Колюшко Д.Г. Анализ состояния ЗУ действующих энергообъектов Украины / Д.Г. Колюшко, С.С. Руденко, Г.М. Колюшко // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. – Вып. 15. – С. 44-48.
4. Богатырев И.Н. Модернизированный измерительный комплекс «КДЗ-1У» / И.Н. Богатырев, В.И. Доценко, О.С. Недзельский, Е.Г. Понуждаева // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 17. – С. 15-18.
5. Колюшко Д.Г. Определение напряжения прикосновения на оборудовании подстанций с учетом статистического характера расчетов сопротивления грунта / Д.Г. Колюшко, Г.М. Колюшко, А.А.Петков // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – Вып. 21. – С. 138-145.
6. Воронина З.А. Влияние частоты измерительного тока при измерении напряжения прикосновения на электрооборудовании энергообъектов с использованием измерительного комплекса «КДЗ-1У» / З.А. Воронина, О.Ю. Глебов, В.М. Жинжиков, Д.Г. Колюшко, Г.М. Колюшко, И.Ю. Линк, А.В. Пличко // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 3. – С. 164-170.

7. Воронина З.А. Влияние сопротивления связи между заземляемой конструкцией и заземляющим проводником на величину измеренного напряжения прикосновения / З.А. Воронина, В.В. Вытришко, В.О. Еремеев, А.В. Кащеев, Г.М. Колиушко // Электрические сети и системы. – 2012. – № 4. – С. 80-85.
8. Колиушко Д.Г. Совершенствование диагностики заземляющих устройств электроэнергообъектов. Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.11.13. Х. НТУ «ХПИ». 2003, 172 с.
9. Колиушко Д.Г. Особенности расчета заземляющих устройств электроэнергообъектов / Д.Г. Колиушко // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – Вып. 21. – 98-103.

**Bibliography (transliterated):**

1. Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. [Chinne vid 20.11.2014]. Kharkiv: MInenergovugiilya Ukrayini, 2014. 793 p. (Natsionalniy standart Ukrayini).
2. Viprobuвання та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова Інструкція. SOU 31.2-21677681-19:2009 [Chinniy vid 2010-03-29]. Kyiv: Minpalivenergo Ukrayini, 2010. 54 p. (Natsionalniy standart Ukrayini).
3. Koliushko D.G., Rudenko S.S., Koliushko G.M., Analiz sostoyaniya ZU deystvuyuschih energoob'ektov Ukrainyi. Visnyk NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI". 2017. Vol. 15. P. 44-48.
4. Bogatyrev I.N., Dotsenko V.I., Nedzelskiy O.S.,

- Ponuzhdaeva E.G., Modernizirovannyiy izmeritelnyiy kompleks "KDZ-1U". Visnyk NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI". 2006. Vol. 17. P. 15-18.
5. Koliushko D.G., Koliushko G.M., Petkov A.A. Opredelenie napryazheniya prikosnoveniya na oborudovanii podstantsiy s uchetom statisticheskogo haraktera raschetov soprotivleniya grunta. Visnyk NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI". 2012. Vol. 21. P. 138-145.
  6. Voronina Z.A., Glebov O.Yu., Zhinzhirov V.M., Koliushko D.G., Koliushko G.M., Link I.Yu., Plichko A.V. Vliyanie chastoty izmeritel'nogo toka pri izmerenii napryazheniya prikosnoveniya na elektrooborudovanii energoob'ektov s ispolzovaniem izmeritel'nogo kompleksa "KDZ-1U". Visnyk NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI". 2006. Vol. 3. P. 164-170.
  7. Voronina Z.A., Vyitrishko V.V., Eremeev V.O., Kascheev A.V., Koliushko G.M. Vliyanie soprotivleniya svyazi mezhdru zamezlyayemoy konstruksiyey i zamezlyayuschim provodnikom na velichinu izmerennogo napryazheniya prikosnoveniya. Elektricheskie seti i sistemy. 2012. No 4. P. 80-85.
  8. Koliushko D.G. Sovershenstvovanie diagnostiki zamezlyayuschih ustroystv elektroenergoob'ektov. Diss. na soiskanie uchenoy stepeni kand. tehn. nauk: 05.11.13. – Kharkiv: NTU "KhPI". 2003, 172 p.
  9. Koliushko D.G. Osobennosti raschyota zamezlyayuschih ustroystv elektroenergoob'ektov. // Visnyk NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI". 2008. Vol. 21. P. 98-103.

Поступила (received) 12.03.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Коліушко Георгій Михайлович (Коліушко Георгій Михайлович, Koliushko Georgiy Mykchailovych)** – провідний науковий співробітник, канд. техн. наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПИ»; тел.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

**Плічко Андрій Валерійович (Плічко Андрей Валерьевич, Plichko Andrii Valeriyovych)** – молодший науковий співробітник, Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПИ»; тел.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

**Понуждаєва Олена Геннадіївна (Понуждаева Елена Геннадьевна, Ponuzhdayeva Helena Gennad'evna)** – завідувач лабораторії, Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПИ»; тел.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

УДК 621.318

**В.И. КРАВЧЕНКО, И.В. ЯКОВЕНКО****ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВОЛНОВОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПЛЕКТУЮЩИХ РАДИОИЗДЕЛИЙ**

Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

**Ключевые слова:** электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетка, бесстолкновительное затухание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости.

**В.И. КРАВЧЕНКО, И.В. ЯКОВЕНКО****ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ХВИЛЕВОДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КОМПЛЕКТУЮЧИХ РАДІОВИРОБІВ**

Визначено механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових надграт, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього електромагнітного випромінювання. Показано, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання на електрорадіовироби часто супроводжується виникненням струмів у провідних елементах виробів та утворенням їх внутрішніх полів. Запропонований механізм появи поверхневих електронних станів на нерівних межах провідних твердих середовищ. Досліджено вплив неоднорідних властивостей поверхні у випромінюючих структурах на спектральні характеристики перехідного та черенківського випромінювання. Побудовано теорію беззіткнувального згасання поверхневих поляритонів у квантовому та класичному наближеннях.

**Ключові слова:** електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, беззіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості.

**V.I. KRAVCHENKO, I.V. YAKOVENKO****INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION ON WAVEGUIDE CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR COMPONENT RADIO ARTICLES**

Mechanisms of initiation of instabilities of natural oscillations of semiconductor superlattices caused by their interaction with flows of charged particles in conditions of influence of electromagnetic radiation are determined. It is shown that influence of pulsed electromagnetic radiation is accompanied by initiation of currents in conducting elements of the articles and initiation of their internal fields. A new mechanism of formation of surface electronic states at uneven surface of conducting solids is developed. Influence of nonuniform properties of surfaces of conducting solids in radiating structures on spectral characteristics of transient and Cherenkov radiation is investigated. A theory of collisionless damping of surface polaritons in quantum and classical approximations is developed.

**Key words:** electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor, superlattice, collisionless damping, kinetic and hydrodynamic instability

**Введение**

Моделирование механизмов возникновения необратимых отказов, возникающих вследствие взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональное назначение изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например, оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой).

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния электромагнитного излучения (ЭМИ) на радиоизделия относятся к области необратимых отказов. (как из-

вестно, все типы отказов, возникающие в электрорадиоизделиях, принято разделять на обратимые и необратимые [1, 2]). Необратимые отказы характеризуются полной утратой работоспособности изделия. Они наступают в случае, когда изменение рабочих характеристик аппаратуры превышает допустимые пределы (при воздействии внешнего ЭМИ необратимые отказы обычно возникают вследствие теплового пробоя комплектов).

В тоже время, для обратимых отказов, характеризуемых временной утратой работоспособности, использование теории цепей не позволяет определять искажения выходных характеристик радиоизделий. Поэтому, большинство вопросов, связанных с опреде-



лением механизмов обратимых отказов, связанных с влиянием наведенных токов на работоспособность изделия в области обратимых отказов остаются открытыми.

Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в этой области исследований обратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике.

### 1. Основные результаты

Предполагается, что в результате воздействия ЭМИ, в периодической структуре, состоящей из полупроводниковых пластин (полупроводниковая сверхрешетка), возникает поток заряженных частиц, который теряет часть своей энергии на возбуждение ее собственных электромагнитных колебаний

В статье исследуются дисперсионные характеристики данной структуры и механизмы взаимодействия потока заряженных частиц с электростатическими колебаниями. Получены выражения для собственных частот и определены энергетические потери наведенных ЭМИ токов на их возбуждение в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах электромагнитных волн.

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

Пусть моноэнергетический нейтральный поток заряженных частиц с плотностью  $n_0$  проходит с постоянной скоростью  $v_0$  через периодическую структуру (период  $q$ ), состоящую из чередующихся плазменных слоев  $d_1, d_2$  и различающихся диэлектрическими постоянными концентрациями электронов проводимости  $N_{01}, N_{02}$ .

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

$$\begin{aligned} \varphi_1(0) &= \varphi_2(0); \\ J_1(0) &= J_2(0). \end{aligned} \quad (1)$$

где  $J_i = \frac{\varepsilon_{0i}}{4\pi} \frac{\partial E_{iz}}{\partial t} + e(N_{0i}u_{iz} + n_0v_{iz} + v_0n_i)$   $i = 1, 2$ .

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

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= 0 \quad ; \operatorname{div}[\varepsilon_0(z)\vec{E}] = 4\pi e(N + n); \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \operatorname{div}[N_0(z)\vec{u}] &= 0; \quad m \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = e\vec{E}; \\ \frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div}(n_0\vec{v} + \vec{v}_0n) &; \quad m \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + v_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \right) = e\vec{E}. \end{aligned} \quad (2)$$

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

В связи с образованием в структуре волн пространственного заряда (ВПЗ), обусловленных движущимся потоком частиц, возникает необходимость в дополнительных граничных условиях. В качестве таковых используются непрерывности потоков заряженных частиц и их импульсов. Эти условия имеют вид:

$$\begin{aligned} n_1(0) &= n_2(0); \\ v_{1z}(0) &= v_{2z}(0). \end{aligned} \quad (3)$$

Используя свойство трансляционной симметрии  $\varphi(z + d) = \varphi(z) \exp(ikd)$  ( $k$  – произвольный волновой вектор), можно представить граничные условия на плоскостях, разделяющих слои, следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi_1(d_1) &= \varphi_2(-d_2) \exp(ikd); \quad J_1(d_1) = J_2(d_2) \exp(ikd); \\ n_1(d_1) &= n_2(-d_2) \exp(ikd); \quad v_{1z}(d_1) = v_{2z}(-d_2) \exp(ikd). \end{aligned} \quad (4)$$

Представляя зависимость всех переменных величин от координат и времени экспоненциальной, легко получить решение уравнений в каждом слое. С помощью граничных условий (2) – (3) можно исключить неопределенные константы и получить дисперсионное уравнение, связывающее между собой частоту, волновые векторы –  $\omega, q_x, q_y, k$  и параметры среды.

Рассмотрим одномерный случай:  $q_x, q_y = 0$ . Решение системы уравнений (1) в  $i$ -м слое имеет вид:

$$\begin{aligned} \varphi_i(z) &= A_i z + B_i + \frac{4\pi e^2 v_0}{\varepsilon_i} \left[ \frac{C_i \exp(i\lambda_i z)}{(\omega + v_0 \lambda_i)^2} + \right. \\ &+ \left. \frac{F_i \exp(-i\lambda_i z)}{(\omega - v_0 \lambda_i)^2} \right] \exp(i \frac{\omega}{v_0} z); \\ E_i &= -A_i - \frac{4\pi i e v_0}{\varepsilon_i} \left[ \frac{C_i \exp(i\lambda_i z)}{\omega + v_0 \lambda_i} + \right. \\ &+ \left. \frac{F_i \exp(-i\lambda_i z)}{\omega - v_0 \lambda_i} \right] \exp(i \frac{\omega}{v_0} z); \end{aligned} \quad (5)$$

$$n_i = (C_i \exp(i\lambda_i z) + F_i \exp(-i\lambda_i z)) \exp(i \frac{\omega}{v_0} z);$$

$$\begin{aligned} v_i &= -\frac{4\pi e^2}{m\lambda_i \varepsilon_i} \left[ \frac{C_i \exp(i\lambda_i z)}{\omega + v_0 \lambda_i} - \right. \\ &- \left. \frac{F_i \exp(-i\lambda_i z)}{\omega - v_0 \lambda_i} \right] \exp(i \frac{\omega}{v_0} z) + \frac{eA_i}{im\omega}. \end{aligned}$$

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

гмюровские частоты электронов неподвижной плазмы и пучка  $A, B, C, F$  – произвольные постоянные. Видно, что потенциал содержит слагаемые различного рода. Первое и второе представляют собой решение уравне-

ния Лапласа  $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$ , третье и четвертое – потенциалы, создаваемые ВПЗ. Легко убедиться, что граничные условия допускают решения  $A_i = 0$ , так как при этом  $J_i(z)$  тождественно обращается в нуль, концентрация и скорость частиц зависят от констант  $C, F$ , а граничные условия для потенциалов (3) и (4) позволяют определить  $B_1, B_2$  через  $C, F$ . При этом из граничных условий получим дисперсионное уравнение:

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = \cos \lambda_1 d_1 \cos \lambda_2 d_2 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}{2\lambda_1 \lambda_2} \sin \lambda_1 d_1 \sin \lambda_2 d_2. \quad (6)$$

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

В случае малой плотности пучка  $\lambda_1 d_1 \ll 1$ ;  $\lambda_2 d_2 \ll 1$  уравнение (6) преобразуется к виду:

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = 1 - \frac{\omega_0^2 d^2}{2v_0^2 \varepsilon_{zz}}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_{zz}(\omega) = d\varepsilon_1 \varepsilon_2 / (d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1)$  – компонента тензора диэлектрической проницаемости мелкодисперсной среды.

В случае слабой пространственной дисперсии:  $\frac{\omega d}{v_0} \ll 1$ ;  $kd \ll 1$  из выражения (7) получим:

$$\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)^2 = \frac{\omega_0^2}{v_0^2 \varepsilon_{zz}}. \quad (8)$$

Закон дисперсии колебаний имеет тот же вид, что и в однородной среде, диэлектрическая проницаемость которой равна  $\varepsilon_{zz}(\omega, d_1, d_2)$ . Из выражения (8) в приближении малой плотности пучка полагая получим:

$$\Delta\omega^2 = \frac{\omega_0^2}{\varepsilon_{zz}(\omega = kv_0)}; \quad \Delta\omega \ll kv_0. \quad (9)$$

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

Инкремент неустойчивости равен:

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

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

Если  $\omega = kv_0$  то мы имеем неустойчивость в условиях черенковского резонанса с инкрементом, который в  $\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\frac{1}{3}}$  раз меньше чем в однородной плазме. В

случае  $\omega_p = \frac{2\pi v_0 l}{d}$  неустойчивость связана с черенковским параметрическим излучением заряженной частицы.

Из выражения (8) следует, что неустойчивость возникает также при условии когда  $\varepsilon_{zz}$  является комплексной величиной и  $\text{Re} \varepsilon_{zz} > 0$ .

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

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

Пусть  $\varepsilon_2 > 0$ ;  $\varepsilon_1 < 0$ . Тогда из формул (8), (9) следует:

$$\Delta\omega^3 = \frac{\omega_0^2 \omega_{p1} d_1}{2\varepsilon_{01} d}. \quad (10)$$

### Выводы

Приведенные количественные оценки инкремента неустойчивостей показывают, что величина энергии излучения лежит в пределах чувствительности современных приемников излучения субмиллиметрового диапазона

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

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

### Список литературы:

1. Белецкий Н.Н. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / Н.Н. Белецкий, В.М. Светличный, Д.Д. Халамейда, В.М. Яковенко. – К.: 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 сооружение 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, В.И. Яковенко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 11. – С. 62-69.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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 [Electromagnetic phenomena of the microwave range in inhomogeneous semiconductor structures]. Kyiv: Naukova dumka. 1991. 216 p.
2. Zi C. Fizika poluprovodnikovyh priborov [Physics of semiconductor devices]. 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 [Electromagnetic influences on communications structures]. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p.
5. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jeletromagnitnym izluchenijam [Ensuring the durability of communication equipment to ionizing

electromagnetic radiation]. 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 karakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jeletroradioizdelij [Influence of external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. P. 62- 69.

7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jeletromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jeletromagnitnogo vozdejstvija [Generation of electromagnetic oscillations of a semiconductor structure under conditions of external electromagnetic influence]. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. P. 161-169.

8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vnesnim jeletromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jeletroradioizdelij [Influence of the flow of charged particles. Induced by external electromagnetic radiation, on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. P. 83-89.

9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jeletromagnitnogo izluchenija na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki [The influence of external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of a semiconductor superlattice]. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. P. 89-96.

10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh struktur jeletroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izluchenija [Attenuation of surface oscillations of semiconductor structures of electronic products under conditions of exposure to external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. P. 96-103.

11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jeletronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izluchenija [Kinetic mechanisms of interaction of surface oscillations with conduction electrons of semiconductor structures under the influence of external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. P. 103-111.

Поступила (received) 12.03.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Кравченко Володимир Іванович (Кравченко Владимир Иванович, Kravchenko Vladimir Ivanovich)** – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел. (057) 707-6079; e-mail: nii90@email.ua

**Яковенко Ігор Володимирович (Яковенко Игорь Владимирович, Yakovenko Igor Vladimirovich)** – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри «Системи інформації» НТУ «ХПІ»; тел. (057) 707 6618; e-mail: yakovenko60IV@ukr.net

УДК 621.318

**В.И. КРАВЧЕНКО, И.В. ЯКОВЕНКО****ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СЛОЯ ТОКАМИ, НАВЕДЕННЫМИ ВНЕШНИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Построена теория взаимодействия потока заряженных частиц с плазмонами, которые существуют в двумерном электронном 2D газе на границе раздела сред с различными электромагнитными свойствами. Предполагается, что электроны в потоке, пересекающем область локализации двумерного электронного слоя, представляют собой волновой пакет, энергия которого мала по сравнению с энергией плазмона. Поэтому взаимодействие плазмонов и электронов описывается в рамках квантово-механического подхода. Подобное взаимодействие приводит к трансформации энергии наведенных токов в энергию колебаний двумерного слоя, т.е их неустойчивости. В работе определены инкременты неустойчивостей такого рода.

Показана возможность использования полученных результатов при оценке работоспособности радиоизделий в условиях воздействия внешнего электромагнитного излучения

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, поток заряженных частиц, электронный газ, черенковское излучение, потенциальный барьер, неустойчивость электромагнитных колебаний.

**В.И. КРАВЧЕНКО, И.В. ЯКОВЕНКО****ЗБУДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ ДВОВИМІРНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ШАРУ СТРУМАМИ, НАВЕДЕНИМИ ЗОВНІШНІМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ**

Побудовано теорію взаємодії потоку заряджених частинок з плазмонами, які існують в двовимірному електронному 2D газі на кордоні розподілу середовищ з різними електромагнітними властивостями. Передбачається, що електрони в потоці, що перетинає область локалізації двовимірному електронного шару, представляють собою хвильовий пакет, енергія якого мала в порівнянні з енергією плазмона. Тому взаємодія плазмонів і електронів описуються в рамках квантово-механічного підходу. Подібна взаємодія призводить до трансформації енергії наведених струмів в енергію коливань двовимірному шару, тобто їх нестійкості. В роботі визначені інкремент неустойчивостей такого роду.

Показана можливість використання отриманих результатів при оцінці працездатності радіовиробів в умовах впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання

**Ключові слова:** електромагнітне поле, потік заряджених частинок, електронний газ, черенковское випромінювання, потенційний бар'єр, нестійкість електромагнітних коливань.

**V.I. KRAVCHENKO, I.V. YAKOVENKO****EXCITATION OF OSCILLATIONS OF TWO-DIMENSIONAL ELECTRON LAYER BY CURRENTS INDUCED BY EXTERNAL RADIATION**

Theory of interaction of a flow of charged particles with plasmons existing in two-dimensional gas at an interface between media with different electromagnetic properties is developed. It is assumed that electrons in a flow intersecting an area of localization of two-dimensional electron layer represent a wave packet which energy is small comparing to the energy of plasmon. Therefore, interaction of plasmons with electrons is described in the framework of quantum-mechanical approach. Such an interaction results in transformation of energy of induced currents into an energy of oscillations of two-dimensional layer, i.e. to their instability. In the work, increments of instabilities of such type are determined. The possibility to use obtained results for estimation of serviceability of radio products in conditions of effects of external electromagnetic radiation is shown.

**Key words:** electromagnetic field, flow of charged particles, electron gas, Cherenkov radiation, potential barrier, instability of electromagnetic oscillations.

**Введение**

Известно, что интерес к структурам, в которых образуется двумерный (2D) электронный слой, связан с их уникальными свойствами (квантовый эффект Холла, особенности фазовых переходов и т.д.) В последние годы, в связи с созданием наноструктур, исследования этих свойств становятся особенно актуальными. В частности, при определении механизмов формирования ультратонких слоев важным является изучение плазменных колебаний, обусловленных коллективным поведением 2D газа.

В настоящей работе исследуется механизм взаи-

модействия потока заряженных частиц, наведенных внешним электромагнитным излучением с плазменными колебаниями 2D электронного слоя. При этом основное внимание уделялось влиянию границы на поведение частиц пучка. Исследована возможность использования полученных результатов при оценке работоспособности радиоизделий при наличии наведенных токов условиях воздействия внешнего электромагнитного излучения.

**Основные результаты**

Рассмотрим плазмоподобный слой толщиной  $2a$ ,

© В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, 2018

окруженный средами с диэлектрическими постоянными  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ . Пусть ось  $OX$  направленно параллельно, а  $OY$  – перпендикулярно границам слоя, так что слой занимает пространство  $-a \leq y \leq a$ . Поведение электронов будем описывать уравнением Шредингера:

$$\frac{\hbar^2}{2m^*} \left( \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial y^2} \right) + (\epsilon_k - U(y)) \psi_k = 0, \quad (1)$$

где  $\epsilon_k$  – энергия частицы,  $m_e$  – эффективная масса,  $V(y)$  – потенциальный барьер:  $U(y) = -U_0$  при  $-a \leq y \leq a$ . Вне слоя  $y > a$ ,  $y < -a$  потенциальный барьер отсутствует. Покажем, что в поле этого потенциала существуют поверхностные электронные состояния. Учет конечной толщины барьера позволяет уточнить условия существования поверхностных электронных состояний.

Для нахождения спектра электронных состояний представим решение уравнения (1) в следующем виде:

$$\begin{aligned} y > a; \psi_k &= A_k e^{-\chi y + ik_x x}; \chi = \sqrt{k_x^2 - \frac{2m_e \epsilon_k}{\hbar^2}} > 0. \\ -a \leq y \leq a, \psi_k &= (B_k e^{iky} + C_k e^{-iky}) e^{ik_x x}; \\ y < -a; \psi_k &= D_k e^{\chi y + ik_x x}, \quad k = \sqrt{\frac{2mU_0}{\hbar^2} - \chi^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Видно, что волновая функция осциллирует, а вне слоя ее амплитуда убывает по экспоненциальному закону. Воспользовавшись условиями непрерывности волновых функций и их производных на плоскостях  $y = \pm a$ , получим дисперсионное соотношение в виде:

$$\chi = k \operatorname{tg} ka. \quad (3)$$

При этом:  $2B_k \cos ka = A_k e^{-\chi a}$ ;  $C_k = B_k$ ;  $D_k = A_k$ .

При условии  $ka \ll 1$  из формулы (3) находим спектр поверхностных электронных состояний  $\chi = \frac{2mU_0}{\hbar^2} a$ . Таким образом, условие существования поверхностных состояний с законом дисперсии

$$\epsilon_k = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m_e} - \frac{2m_e U_0^2 a^2}{\hbar^2} \quad (4)$$

определяется неравенством:

$$\frac{\hbar^2}{2m_e a^2} \gg U_0.$$

Область локализации электронов превосходит толщину слоя  $2a$ . Полагая, что зависимость потенциального барьера имеет вид  $U(y) = -V_0 \delta(y)$ ;  $V_0 > 0$  и учитывая равенство волновых функций на границе и разрыв их производных, получим следующий закон дисперсии поверхностных электронных состояний:

$$\epsilon_k = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m_e} - \frac{m_e V_0^2}{2\hbar^2}. \quad (5)$$

Если ввести обозначения  $\chi_0 = \sqrt{\frac{2mU_0}{\hbar^2}}$ ;  $\frac{\chi}{\chi_0} = \eta$ ,

то уравнение (4) можно представить в виде:

$$\eta = \sqrt{1 - \eta^2} \operatorname{tg} \left( \chi_0 a \sqrt{1 - \eta^2} \right). \quad (6)$$

Зависимость  $\eta(\chi a)$ , определяющая область суще-

ствования поверхностных электронных состояний, представляет собой набор кривых, аналогичных дисперсионным характеристикам для электромагнитных полей, распространяющихся в слое диэлектрика. Ограничимся случаем  $\chi_0 a \ll 1$ . Принимая во внимание, что плотность электронов  $N(y) = \sum_k \psi_k^* \psi_k$ , получаем

$$N(y) = N_0 e^{-2\chi|y|}. \quad (7)$$

Предполагается, что электроны в слое компенсируются фоном положительно заряженных частиц.

Предположим далее, что через слой проходит внешний поток электронов из области «1» в область «2». Частицы в пучке описываются волновыми функциями:

$$\begin{aligned} \psi_0^{(p)} &= f_p \exp i(k_{yp} y - \omega_{k_0} t); \quad \omega_{k_0} = \frac{E_{k_0}}{\hbar}; \\ k_1 = k_2 &= -k_3; \quad k_0 = \sqrt{\frac{2mE_{k_0}}{\hbar^2}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $E_{k_0}$  – энергия частицы, падающей на слой,  $m$  – ее масса, индексы  $p = 1, 2, 3$  соответствуют волновым функциям для падающих, прошедших и отраженных частиц. Связь амплитуд волновых функций  $\psi_0^{(p)}$  определяется из граничных условий. Полагая, что толщина слоя бесконечно мала, считаем, что зависимость потенциала  $U(y)$  имеет  $\delta$ -образный характер. Граничные условия для  $\psi_0^{(p)}$  при  $y = 0$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \psi_0^{(1)} + \psi_0^{(3)} &= \psi_0^{(2)}; \\ \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial \psi_0^{(1)}}{\partial y} + \frac{\partial \psi_0^{(3)}}{\partial y} - \frac{\partial \psi_0^{(2)}}{\partial y} \right) &= V_0 \psi_0^{(2)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Из выражения (9) получаем  $f_2 = \frac{k_0}{k_0 - i\chi} f_1$ ,

$f_3 = \frac{i\chi}{k_0 - i\chi} f_1$ . Амплитуда связана с концентрацией

электронов в пучке соотношением  $|f_1|^2 = n_0$ .

Для описания взаимодействия потока частиц с электромагнитными колебаниями, обусловленными коллективным поведением  $2D$  электронного газа, будем исходить из следующей системы уравнений для каждой из сред:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= 0; \\ \operatorname{div} \epsilon(y) \vec{E} &= 4\pi e(n + N); \\ e \frac{\partial N}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{J} &= 0; \\ e \frac{\partial n^{(p)}}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}^{(p)} &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $n^{(p)}$ ,  $\vec{j}^{(p)}$ ,  $N$ ,  $\vec{J}$  – неравновесные концентрации носителей и токи, создаваемые полями в пучке и слое.

Систему уравнений (10) необходимо дополнить материальными уравнениями. Концентрацию в пучке определим через возмущенную  $\Psi^{(r)}$  и невозмущенную  $\Psi_0^{(p)}$  волновые функции электронов и векторный потенциал  $A$ , связанный с электрическим полем соотно-

шением  $\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t}$ ; ( $r = 1, 2$ ) (калибровка выбрана

таким образом, чтобы скалярный потенциал  $\varphi = 0$ ). Возмущенная волновая функция  $\Psi^{(r)}$  в первом приближении по  $A$  находится из уравнений Шредингера для каждой из сред:

$$\begin{aligned} i\hbar \frac{\partial \Psi^{(1)}}{\partial t} - H^{(0)} \Psi^{(1)} &= H^{(1)} (\Psi_0^{(1)} + \Psi_0^{(3)}); \quad y < 0; \\ H^{(0)} &= -\frac{\hbar^2 \Delta}{2m}; \quad H^{(1)} = \frac{ie\hbar}{2mc} (\vec{\nabla} \vec{A}_1 + \vec{A}_1 \vec{\nabla}); \\ \hbar \frac{\partial \Psi^{(2)}}{\partial t} - H^{(0)} \Psi^{(2)} &= H^{(2)} \Psi_0^{(2)}; \quad y > 0, \quad (11) \\ H^{(2)} &= \frac{ie\hbar}{2mc} (\vec{\nabla} \vec{A}_2 + \vec{A}_2 \vec{\nabla}). \end{aligned}$$

Тогда концентрации электронов и токи в пучке можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} n &= n^{(1)} + n^{(3)}; \quad n^{(p)} = \Psi_0^{(p)} \Psi^{(1)*} + \Psi_0^{(p)*} \Psi^{(1)}; \quad p = 1, 3; \quad y < 0; \\ \vec{j} &= \vec{j}^{(1)} + \vec{j}^{(3)}; \\ \vec{j}^{(p)} &= \frac{ie\hbar}{2m} \{ \Psi^{(1)} \nabla \Psi_0^{(p)*} - \Psi^{(1)*} \nabla \Psi_0^{(p)} + \Psi_0^{(p)} \nabla \Psi^{(1)*} - \\ &- \Psi_0^{(p)*} \nabla \Psi^{(1)} \} - \frac{e^2}{mc} |f_p|^2 A_1; \quad p = 1, 3; \\ n &= n^{(2)}; \quad n^{(2)} = \Psi_0^{(2)} \Psi^{(2)*} + \Psi_0^{(2)*} \Psi^{(2)}; \quad y > 0; \quad (12) \\ \vec{j} &= \vec{j}^{(2)}; \\ \vec{j}^{(2)} &= \frac{ie\hbar}{2m} \{ \Psi^{(2)} \nabla \Psi_0^{(2)*} - \Psi^{(2)*} \nabla \Psi_0^{(2)} + \Psi_0^{(2)} \nabla \Psi^{(2)*} - \\ &- \Psi_0^{(2)*} \nabla \Psi^{(2)} \} - \frac{e^2}{mc} |f_p|^2 A_2. \end{aligned}$$

Ток в слое  $\vec{J} = [\vec{J}, 0]$  определяется следующим соотношением:

$$J = -\frac{e^2 N(y)}{m_e c} A_{1x}.$$

Пространственную дисперсию проводимости слоя, обусловленную переходами электронов между различными состояниями вследствие их рассеяния на потенциале мы учитываем, полагая температуру электронов равной нулю.

На границе раздела сред  $y = 0$  выполняются электродинамические условия:

$$\begin{aligned} A_{1x}(0) &= A_{2x}(0); \\ \varepsilon_{01} \frac{\partial^2 A_{1y}}{\partial t^2} + \varepsilon_{02} \frac{\partial^2 A_{2y}}{\partial t^2} + 4\pi c (\vec{j}_y^{(1)} + \vec{j}_y^{(3)} - \vec{j}_y^{(2)}) &= \\ &= \frac{4\pi e^2 N_0 d}{m} \frac{\partial A_{1x}}{\partial x}; \\ d &= \frac{\hbar^2}{mV_0}, \end{aligned} \quad (13)$$

а также условия для возмущенных волновых функций электронов пучка:

$$\Psi^{(1)}(0) = \Psi^{(2)}(0);$$

$$\left. \frac{\partial \Psi^{(1)}}{\partial y} - \frac{\partial \Psi^{(2)}}{\partial y} \right|_{y=0} = 2\chi \Psi^{(1)}(0)$$

Поскольку взаимодействие волн и частиц предполагается слабым, то решение приведенных уравнений находится методом последовательных приближений. В первом приближении полагаем концентрацию электронов пучка и частоту столкновений равной нулю  $n_0 \rightarrow 0$ ;  $\nu \rightarrow 0$ . Тогда решение системы уравнений Максвелла и материальных уравнений можно представить через величину векторного потенциала.

Поскольку  $\text{rot} \vec{A} = 0$ ;  $\text{div} \vec{A} = 0$  имеем:

$$\begin{aligned} A_{1x} &= A e^{-\alpha y} \cos \alpha; \quad A_{1y} = -A e^{-\alpha y} \sin \alpha; \quad y > 0; \\ A_{2x} &= A e^{\alpha y} \cos \alpha; \quad A_{2y} = A e^{\alpha y} \sin \alpha; \quad y < 0, \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\alpha = qx - \omega_s t + \theta, \quad \omega_s = \left[ \frac{4\pi e^2 N_0 qd}{m_e (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right]^{\frac{1}{2}} = \omega_0 \left[ \frac{qd}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

– частота плазмонов двумерного электронного газа,

$\omega_0 = \left[ \frac{4\pi e^2 N_0}{m_e} \right]^{\frac{1}{2}} N_0 d = N_{0s}$  – поверхностная плотность заряда.

Если диэлектрические проницаемости сред 1 – 2 обладают частотной дисперсией  $\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - \frac{\omega_{0i}^2}{\omega^2}$  то час-

тота поверхностных плазмонов  $\omega_s = \frac{\Omega_s}{\sqrt{\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02}}}$ , где

$$\Omega_s = \sqrt{\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2 + \omega_0^2 qd}.$$

Учтем теперь конечную плотность пучка и получим уравнение, описывающее медленное изменение

во времени амплитуды поля плазмона  $\left| \frac{\partial A}{\partial t} \right| \ll \omega_s A$ .

Для этого необходимо, подставив в правую часть уравнений (12) выражения для потенциала (13), найти их решения, удовлетворяющие граничному условию. Затем следует найти возмущенные концентрации электронов и токи в пучке, создаваемые продольным пучком и удовлетворить граничным условиям.

Решение уравнения Шредингера представляет собой сумму решений однородного и неоднородного уравнений. Из правой части уравнений (11) следует, что их решения описывают состояния электронов с энергиями  $\hbar\omega_{\pm} = \hbar(\omega_{k_0} \pm \omega_s)$ , возникающими в результате их взаимодействия с плазмонами. Поэтому, возмущенным волновым функциям  $\psi^{(r)}$  в дальнейшем снизу будем приписывать индексы «+» или «-». Тогда  $\psi^{(r)} = \psi_+^{(r)} + \psi_-^{(r)}$ . Таким образом, решения уравнений (11) с граничными условиями принимают вид:

$$\begin{aligned} \psi_{\pm}^{(1)} &= -i \frac{\Omega}{2\omega_s} \psi_0^{(1)} F_1^{\pm} e^{\pm i\alpha}; \\ \psi_{\pm}^{(2)} &= i \frac{\Omega}{2\omega_s} \psi_0^{(2)} F_2^{\pm} e^{\pm i\alpha}; \\ F_1^{\pm} &= \left( 1 - \frac{k_0 + i\chi}{k_{\pm} - i\chi} \right) e^{-i(k_0 + k_{\pm})y} - e^{qy} \left[ 1 - \frac{i\chi}{k_0 - i\chi} e^{-2ik_0 y} \right]; \\ F_2^{\pm} &= \left( \frac{k_0 + i\chi}{k_{\pm} - i\chi} \right) e^{i(k_{\pm} - k_0)y} - \frac{k_0}{k_0 - i\chi} e^{-qy}. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь

$$\hbar\Omega = \frac{ev_0 A}{c}, \quad v_0 = \frac{\hbar k_0}{m}, \quad k_{\pm} = \sqrt{k_0^2 \pm \frac{2m\omega_s}{\hbar}}.$$

Тогда выражения для концентрации  $n^{(p)} = n_+^{(p)} + n_-^{(p)}$  приобретают вид:

$$\begin{aligned} n^{(1)} &= \Psi_0^{(1)*} (\Psi_+^{(1)} + \Psi_-^{(1)}) + \text{к.с.} = \\ &= -i \frac{\Omega n_0}{2\omega_s} (F_1^+ e^{i\alpha} + F_1^- e^{-i\alpha}) + \text{к.с.}; \\ n^{(2)} &= \Psi_0^{(2)*} (\Psi_+^{(2)} + \Psi_-^{(2)}) + \text{к.с.} = \\ &= i \frac{\Omega k_0 n_0}{2\omega_s (k_0 + i\chi)} (F_2^+ e^{i\alpha} + F_2^- e^{-i\alpha}) + \text{к.с.}; \\ n^{(2)} &= \Psi_0^{(3)*} (\Psi_+^{(1)} + \Psi_-^{(1)}) + \text{к.с.} = \\ &= -\frac{\chi \Omega k_0 n_0}{2\omega_s (k_0 + i\chi)} e^{2ik_0 y} (F_1^+ e^{i\alpha} + F_1^- e^{-i\alpha}) + \text{к.с.} \end{aligned} \quad (16)$$

Ограничимся случаем:  $k_0^2 \gg \frac{\omega_s^2}{v_0^2}$ . Тогда имеем:

$$k_{\pm} = k_0 \pm \frac{\omega_s}{v_0}. \text{ Это значит, что разброс импульсов } \Delta p$$

относительно  $p_0$  очень мал, то есть  $\Delta p v_0 \ll \hbar \omega_s$ . В результате получим выражения для возмущенных концентраций:

$$\begin{aligned} n^{(2)} &= 2 \frac{\Omega k_0 n_0}{(k_0^2 + \chi^2)^2 v_0} \left[ (k_0^2 + \chi^2) \sin \left( \alpha + \frac{\omega_s}{v_0} y \right) - \right. \\ &\left. - \frac{\omega_s}{v_0} \frac{k_0^2 - \chi^2}{k_0^2 + \chi^2} \cos \left( \alpha + \frac{\omega_s}{v_0} y \right) \right], \end{aligned} \quad (17)$$

$$n^{(3)} = 4 \frac{\chi^2 \Omega k_0 n_0}{(k_0^2 + \chi^2)^2 v_0} \left[ (k_0^2 + \chi^2) \sin \left( \alpha - \frac{\omega_s}{v_0} y \right) \right].$$

Выражение для  $n^{(1)}$  мы не приводим, так как оно не вносит вклад в инкремент. Используя формулу (2) введем параметры:

$$Z_2 = 2 \frac{k_0^2 (k_0^2 - \chi^2)}{(k_0^2 + \chi^2)^2}; \quad Z_3 = 4 \frac{k_0^2 \chi^2}{(k_0^2 + \chi^2)^2}$$

Тогда, полагая  $v_1 = v_2$ , получим выражение для инкремента:

$$\gamma = \frac{\omega_b^2 q v_0}{\Omega_s^2} \left( 1 + \frac{U_0^2 a^2}{\hbar^2 v_0^2} \right)^{-1}. \quad (18)$$

Здесь:  $V_0 = 2U_0 a$ .

Если на границе сред не учитывать наличие барьера ( $U_0 \rightarrow 0$ ), то имеем  $\gamma = \frac{\omega_b^2 q v_0}{\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2}$ . Видно, что учет потенциального барьера приводит к уменьшению инкремента и при  $U_0 \rightarrow \infty$  он обращается в нуль. В случае, когда среды 1 – 2 не обладают частотной дисперсией, то инкремент приобретает вид:

$$\gamma = \frac{\omega_b^2 v_0}{\omega_b^2 d} \left( 1 + \frac{U_0^2 a^2}{\hbar^2 v_0^2} \right)^{-1}. \quad (19)$$

Таким образом, величина инкремента обратно пропорциональна времени пролета частицей области локализации 2 D электронного газа.

### Количественные оценки.

Приведем численные оценки для гетероструктуры *AlGaAs–GaAs* с двумерным электронным газом на границе. Для типичных значений пучка:

$$\Omega_{ss} = 10^{12} \text{ с}^{-1}, \quad d = 10^{-7} \text{ см}, \quad q_{\chi} = 10^2 \text{ см}^{-1}, \quad V_0 = 10^{12} \text{ с}^{-1}$$

инкремент достигает величины  $0,1\Omega_s$ , что превосходит частоту столкновений носителей в полупроводниковой структуре. Таким образом, величина инкремента превосходит затухание плазмонов, обусловленное процессами рассеяния электронов, что означает возможность развития подобных неустойчивостей.

### Выводы

1. Исследованы механизмы взаимодействия потока заряженных частиц, наведенных внешним ЭМИ с собственными электромагнитными колебаниями двумерного электронного слоя на границе раздела сред. Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа колебаний системы пучок – двумерный слой, определен инкремент их неустойчивости.

2. Определены механизмы влияния границы на взаимодействие поверхностных колебаний и электронов при наличии потенциального барьера. В качестве объекта исследований рассмотрены поверхностные плазмоны.

3. Проведен сравнительный анализ неустойчивостей плазменных колебаний в условиях, когда взаимодействие волн и частиц происходит при наличии потенциального барьера и без него. Показано, что величина инкремента связана с изменением размеров области взаимодействия волн и частиц.

### Список литературы:

1. Белецкий Н.Н. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / Н.Н. Белецкий, В.М. Светличный, Д.Д. Халамейда, В.М. Яковенко. – К.: 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 комплектующих 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. 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.
8. Кравченко В.И. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83-89.
9. 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.
10. 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.
11. 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 [Electromagnetic phenomena of the microwave range in inhomogeneous semiconductor structures]. Kyiv: Naukova dumka. 1991. 216 p.
2. Zi C. Fizika poluprovodnikovyh priborov [Physics of semiconductor devices]. 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 [Electromagnetic influences on communications structures]. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p.
5. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jeletromagnitnym izluchenijam [Ensuring the durability of communication equipment to ionizing electromagnetic radiation]. 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 karakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jeletroradioizdelij [Influence of external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. P. 62- 69.
7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jeletromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jeletromagnitnogo vozdejstvija [Generation of electromagnetic oscillations of a semiconductor structure under conditions of external electromagnetic influence]. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. P. 161-169.
8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vneshnim jeletromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jeletroradioizdelij [Influence of the flow of charged particles. Induced by external electromagnetic radiation, on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. P. 83-89.
9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jeletromagnitnogo izluchenija na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki [The influence of external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of a semiconductor superlattice]. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. P. 89-96.
10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh stuktur jeletroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izluchenija [Attenuation of surface oscillations of semiconductor structures of electronic products under conditions of exposure to external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. P. 96-103.
11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jeletronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izluchenija [Kinetic mechanisms of interaction of surface oscillations with conduction electrons of semiconductor structures under the influence of external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. P. 103-111.

Поступила (received) 19.03.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Кравченко Володимир Іванович (Кравченко Владимир Иванович, Kravchenko Vladimir Ivanovich)** – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел. (057) 707-60-79; e-mail: nii90@email.ua

**Яковенко Ігор Володимирович (Яковенко Игорь Владимирович, Yakovenko Igor Vladimirovich)** – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри «Системи інформації» НТУ «ХПІ»; тел. (057) 707 66 18; e-mail: yakovenko60IV@ukr.net



УДК 621.317.3

**Ю.С. НЕМЧЕНКО, И.П. ЛЕСНОЙ****ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА МОЛНИЕСТОЙКОСТЬ ПО СТАНДАРТУ DO-160G (США)**

Подробно рассмотрены требования к проведению испытаний на молниестойкость по стандартам DO-160D и DO-160G, изложены требования к количеству и выходным характеристикам испытательных генераторов (всего 18 единиц). Имеющийся в ИЛ НИПКИ «Молния» парк испытательных генераторов из 14 единиц полностью позволяет проводить испытания по обоим стандартам, но для реализации полного объема испытаний по DO-160G требуется доукомплектация еще 4-мя испытательными генераторами.

**Ключевые слова:** испытания, молниестойкость, формы и виды испытательных воздействий, нормы испытаний, испытательные генераторы.

**Ю.С. НЕМЧЕНКО, И.П. ЛЕСНОЙ****ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ НА БЛИСКАВКОСТІЙКІСТЬ ЗА СТАНДАРТОМ DO-160G (США)**

Детально розглянуто вимоги до проведення випробувань на блискавкостійкість за стандартами DO-160D і DO-160G, викладено вимоги до кількості та вихідних характеристик випробувальних генераторів (всього 18 одиниць). Наявний в ВЛ НДПКІ «Молнія» парк випробувальних генераторів з 14 одиниць повністю дозволяє проводити випробування за обома стандартами, але для реалізації повного обсягу випробувань за DO-160G потрібна доукомплектація ще 4-ма випробувальними генераторами.

**Ключові слова:** випробування, блискавкостійкість, форми і види випробувальних впливів, норми випробувань, випробувальні генератори.

**Y.S.NEMCHENKO, I.P. LESNOY****EQUIPMENT FOR TEST RESISTANCE FOR MILITARY STABILITY UNDER STANDARD DO-160G (USA)**

Requirements for lightning-fastness tests according to DO-160D and DO-160G standards are considered in detail, requirements for the quantity and output characteristics of test generators (total 18 units) are stated. Available in the UL NPPKI "Lightning", the park of test generators from 14 units completely allows testing on both standards, but for the implementation of the full scope of tests for the DO-160G requires additional equipment with 4 other test generators.

**Key words:** tests, lightning resistance, forms and types of test actions, test standards, test generators.

**Введение.** В 2004 году в Украине был узаконен и введен в эксплуатацию стандарт США для гражданских самолетов DO-160D (Квалификационные требования. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воздействующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний), по которому до сих пор необходимо проводить испытания всего разрабатываемого в Украине бортового авиационного оборудования (БАО). В этом стандарте р. 22 посвящен испытаниям БАО на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией. До настоящего времени в США этот стандарт несколько раз пересматривался и там сейчас действует версия DO-160G. Однако, во всех версиях стандартов от DO-160D до DO-160G базовые требования к испытаниям на молниестойкость практически не изменились, за исключением некоторых уточнений и корректировок.

К этим базовым требованиям относятся:

- неизменность временных форм испытательных токов и напряжений;
- неизменность видов испытательных молниевых

разрядов;

- неизменность методов ввода помех;
- неизменность норм испытаний;

Главное отличие стандарта DO-160G от DO-160D заключается в том, что расширен перечень испытательных комплектов для различного набора кабельных жгутов (наборы от А до К по стандарту DO-160D, и наборы от А до М по стандарту DO-160G за счет включения формы 6 испытательных токов в номенклатуру испытаний.

**1 Формы испытательных волн****1.1 Испытательная волна тока формы 1**

Испытательная волна тока формы 1 (рис. 1) представляет собой униполярный биэкспоненциальный импульс со временем нарастания от 0 до максимума  $T_1 = 6,4 \text{ мкс} \pm 20 \%$  и временем до полуспада  $T_2 = 69 \text{ мкс} \pm 20 \%$ .

**1.2 Испытательная волна напряжения формы 2**

Испытательная волна напряжения формы 2 (рис. 2) представляет собой биполярный импульс с временем нарастания  $T_1$  не более 100 нс и временем перехода через ноль  $T_1 = 6,4 \text{ мкс} \pm 20 \%$ .

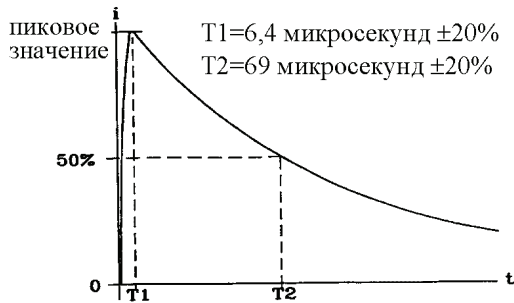


Рисунок 1 – Испытательный ток формы 1

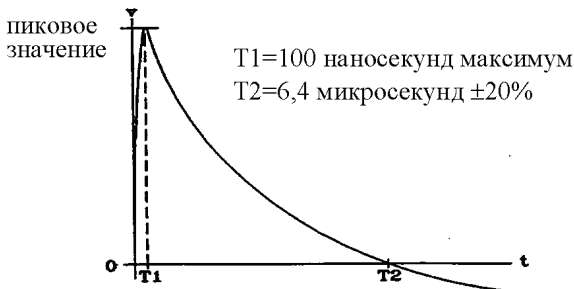


Рисунок 2 – Испытательное напряжение формы 2

1.3 Испытательная волна напряжения/тока формы 3

Испытательная волна напряжения /тока формы 3 (рис. 3) представляет собой затухающую синусоиду (косинусоиду) с частотами 1 МГц  $\pm 20\%$  и 10 МГц  $\pm 20\%$  и затуханием на 5 периоде синусоиды от 25 % до 75 % от амплитуды первого периода.

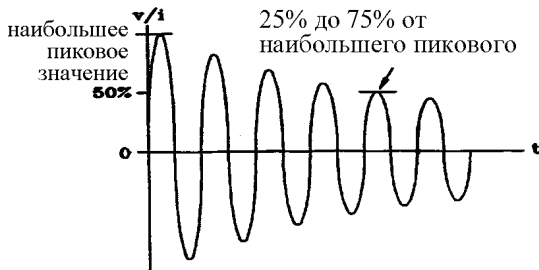


Рисунок 3 – Испытательное напряжение / предельный ток формы 3

1.4 Испытательная волна напряжения формы 4

Испытательная волна напряжения формы 4 (рис. 4) представляет собой униполярный биэкспоненциальный импульс с временем нарастания от 0 до максимума  $T1 = 6,4 \text{ мкс} \pm 20\%$  и временем до полуспада  $T2 = 69 \text{ мкс} \pm 20\%$ .

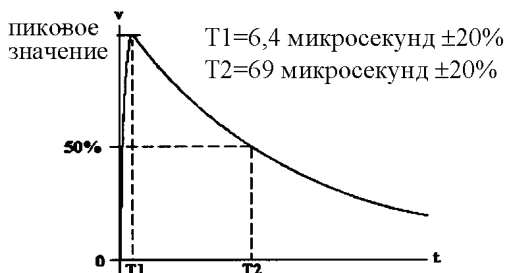


Рисунок 4 – Испытательное напряжение формы 4

1.5 Испытательная волна тока/напряжения формы 5

Испытательная волна тока/напряжения формы 5 (рис. 5) имеет две разновидности – 5А и 5В.

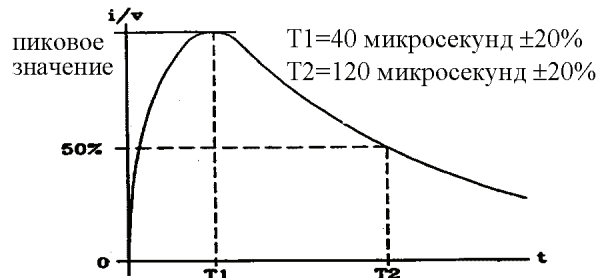


Рисунок 5 – Испытательный ток формы 5А

Испытательная волна тока/напряжения формы 5А представляет собой униполярный биэкспоненциальный импульс с временем нарастания от 0 до максимума  $T1 = 40 \text{ мкс} \pm 20\%$  и временем до полуспада  $T2 = 120 \text{ мкс} \pm 20\%$ .

Испытательная волна тока/напряжения формы 5В представляет собой униполярный биэкспоненциальный импульс с временем нарастания от 0 до максимума  $T1 = 50 \text{ мкс} \pm 20\%$  и временем до полуспада  $T2 = 500 \text{ мкс} \pm 20\%$ .

1.6 Испытательная волна тока формы 6

Испытательная волна тока формы 6 (рис. 6) представляет собой униполярный биэкспоненциальный импульс с временем нарастания от 0 до максимума  $T1 = 0,25 \text{ мкс} \pm 20\%$  и временем до полуспада  $T2 = 4 \text{ мкс} \pm 20\%$ .

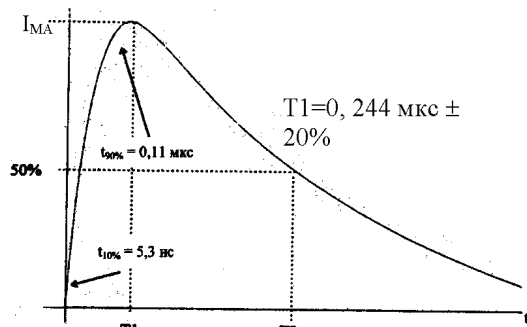


Рисунок 6 – Испытательный ток формы 6

Испытательная волна тока формы 6 в стандарте DO-160D только декларировалась, и никаких указаний о ее использовании не давалось, а в стандарте DO-160G данная форма является полноправным видом испытаний при «многократных вспышках».

2 Виды испытательных молниевых разрядов

Испытательные молниевые разряды делятся на три вида:

- единичные удары;
- многократные удары;
- многократные вспышки.

2.1 Единичные удары представляют собой единичные импульсы тока или напряжения форм 1, 2, 3,

4, 5.

**2.2 Многократные удары (Multiple Stroke)** Многократные удары (рис. 7) представляют собой последовательность из 14 следующих друг за другом импульсов тока или напряжения одинаковой формы (формы 1, 2, 3, 4, 5) за время менее 1,5 с. При этом амплитуда первого удара вдвое превышает амплитуды последующих ударов.

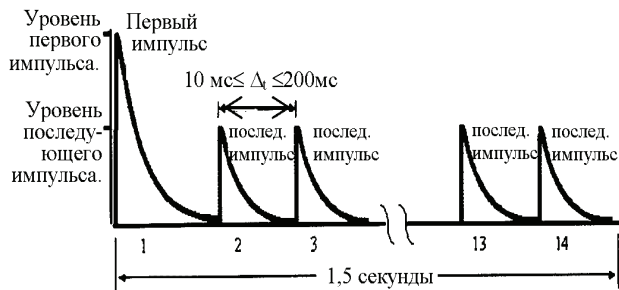


Рисунок 7 – Циклограмма испытательного воздействия вида «многократные удары»

### 2.3 Многократные вспышки (Multiple Burst)

Многократные вспышки (рис. 8) представляют собой последовательность из испытательных пакетов, состоящих из 20 импульсов испытательного напряжения форм 3 или испытательного тока формы 6 с интервалом между импульсами от 50 до 1000 мкс. Три пакета с интервалами между ними от 30 мс до 300 мс образуют пачку испытательных импульсов.

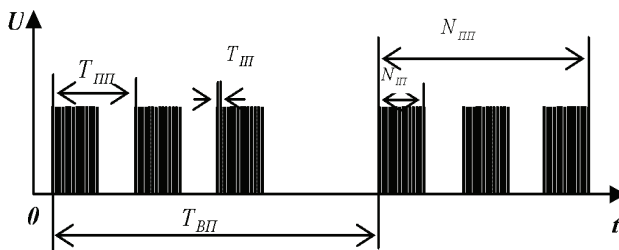


Рисунок 8 – Циклограмма испытательного воздействия вида «многократные вспышки»

Временные параметры циклограммы:

- интервал между испытательными импульсами в пакете  $T_{III}$  – от 50 мкс до 1000 мкс;
- количество испытательных импульсов в пакете  $N_{III} = 20$ ;
- интервал между пачками  $T_{III}$  – от 30 мс до 300 мс;
- количество пачек в испытательном пакете  $N_{III}$  – 3;
- интервал между испытательными пакетами  $T_{ВП}$  –  $(3с \pm 0,3с)$ .

### 3 Методы ввода помехи

Помеха вводится в испытываемое изделие тремя методами:

- контактный ввод;
- кабельный ввод, состоящий из двух видов:
  - кабельная инъекция;
  - ввод в заземление.

### 3.1 Контактный ввод

Испытание контактным вводом – это способ испытаний, при котором единичные удары напряжения форм 3 (1 МГц), 4 или 5 А подаются непосредственно на означенные контакты разъема испытываемого оборудования, обычно между каждым контактом и заземлением на корпус. Такой способ применяется для оценки устойчивости схем сопряжения оборудования к предельному для диэлектрика напряжению или повреждению.

### 3.2 Кабельная инъекция

Кабельная инъекция – это способ испытаний, при котором помеха форм 1, 2, 3 видов единичных и многократных ударов и форм 3 и 6 многократных всплеск бесконтактно (через инжектор) вводится в кабельные жгуты.

Ввод в заземление – это способ испытаний, при котором помеха форм 4 или 5А видов единичных и многократных ударов вводится в заземление испытываемых изделий.

### 4 Нормы испытаний

Нормы испытаний состоят из пяти испытательных уровней, каждый из которых выбирается в зависимости от расположения испытываемого изделия внутри корпуса самолета. Нормы испытаний характеризуются испытательными параметрами: испытательным током/предельным напряжением или испытательным напряжением/ предельным током. Испытательные токи  $I_T$  (напряжения  $V_T$ ) представляют собой параметры, которые обязательно должны выполняться при испытаниях с условием, что при этом не будут превышены соответствующие им напряжения  $V_L$  (токи  $I_L$ ), которые называются предельными. Это необходимо для того, чтобы предотвратить перенапряжение испытываемого оборудования сверх требуемых уровней.

4.1 Испытательные и предельные уровни для метода «контактного ввода»

4.1.1 Испытательные и предельные уровни для метода «контактного ввода» для формы 3

Диапазон испытательных напряжений от 100 В до 3200 В при диапазоне предельных токов короткого замыкания от 4 А до 128 А.

4.1.2 Испытательные и предельные уровни для метода контактного ввода для формы 4

Диапазон испытательных напряжений от 50 В до 1600 В при диапазоне предельных токов короткого замыкания от 10 А до 320 А.

4.1.3 Испытательные и предельные уровни для метода контактного ввода для формы 5А

Диапазон испытательных напряжений от 50 В до 1600 В при диапазоне предельных токов короткого замыкания от 50 А до 1600 А.

4.2 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» единичными ударами

4.2.1 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» единичными ударами формы 1.

Диапазон испытательных токов от 100 А до 3200 А при диапазоне предельных напряжений от 50 В до

1600 В.

4.2.2 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» единичными ударами формы 2.

Диапазон испытательных напряжений от 50 В до 1600 В при диапазоне предельных токов от 100 А до 3200 А

4.2.3 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» единичными ударами формы 3.

Диапазон испытательных напряжений от 100 В до 3200 В при диапазоне предельных токов от 20 А до 640 А.

4.2.4 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» единичными ударами формы 4.

Диапазон испытательных напряжений от 50 В до 1600 В при диапазоне предельных токов от 100 А до 3200 А.

4.2.5 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» единичными ударами формы 5А.

Диапазон испытательных токов от 150 А до 5000 А при диапазоне предельных напряжений от 50 В до 1600 В.

4.3 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» многократными ударами (первый удар)

4.3.1 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» многократными ударами (первый удар) формы 1. Диапазон испытательных токов от 50 А до 1600 А при диапазоне предельных напряжений от 50 В до 1600 В.

4.3.2 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» многократными ударами (первый удар) формы 2.

Диапазон испытательных напряжений от 50 В до 1600 В при диапазоне предельных токов от 50 А до 1600 А

4.3.3 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» многократными ударами (первый удар) формы 3.

Диапазон испытательных напряжений от 100 В до 3200 В при диапазоне предельных токов от 20 А до 640 А.

4.3.4 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» многократными ударами (первый удар) формы 4.

Диапазон испытательных напряжений от 25 В до 800 В при диапазоне предельных токов от 50 А до 1600 А.

4.3.5 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» многократными ударами (первый удар) формы 5А.

Диапазон испытательных токов от 60 А до 2000 А при диапазоне предельных напряжений от 20 В до 640 В.

4.4 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» многократными вспышками

4.4.1 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» многократными вспышка-

ми формы 3

Диапазон испытательных напряжений от 60 В до 1920 В при диапазоне предельных токов от 1 А до 32 А.

4.4.2 Испытательные и предельные уровни для метода «кабельного ввода» многократными вспышками формы 6

Диапазон испытательных токов от 5 А до 160 А при диапазоне предельных напряжений от 100 В до 3200 В.

## **5 Номенклатура и технические характеристики испытательных генераторов «контактного ввода»**

### **5.1 Испытательный генератор «контактного ввода» формы 3 (1 МГц)**

– условное обозначение – TG-PI-3 (1 МГц);

– форма выходного напряжения 3 (по рис. 3);

– диапазон амплитуд выходных напряжений (в режиме х/х) от 100 В до 3200 В (5 фиксированных диапазонов);

– внутреннее сопротивление – 25 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-КВ (режим «форма 3») имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **5.2 Испытательный генератор «контактного ввода» формы 4**

– условное обозначение – TG-PI-4;

– форма выходного напряжения 4 (по рис. 4);

– диапазон амплитуд выходных напряжений (в режиме х/х) от 50 В до 1600 В (5 фиксированных диапазонов);

– внутреннее сопротивление – 5 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-КВ (режим «форма 4») имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **5.3 Испытательный генератор «контактного ввода» формы 5А**

– условное обозначение – TG-PI-5А;

– форма выходного напряжения 5А (по рис. 5);

– диапазон амплитуд выходных напряжений (в режиме х/х) от 50 В до 1600 В (5 фиксированных диапазонов);

– внутреннее сопротивление – 1 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-КВ (режим «форма 5А») имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

## **6 Номенклатура и технические характеристики испытательных генераторов «кабельной инъекции»**

### **6.1 Испытательный генератор «кабельной инъекции» формы 1 (единичные удары)**

– условное обозначение TG-KI-SS-1;

– вид испытательных импульсов – единичные удары;

– форма испытательного тока 1 (по рис. 1);

– диапазон амплитуд испытательных токов от 100 А до 3200 А (5 фиксированных диапазонов);

– внутреннее сопротивление – 0,5 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-КИ-1,2 (режим «форма 1») имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **6.2 Испытательный генератор «кабельной инъекции» формы 2 (единичные удары)**

– условное обозначение – TG-KI-SS-2;  
– вид испытательных импульсов – единичные удары;

– форма испытательного напряжения 2 (по рис. 2);

– диапазон амплитуд испытательного напряжения от 50 В до 1600 В (5 фиксированных диапазонов);  
– внутреннее сопротивление – 0,5 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-КИ-1,2 (режим «форма 2») имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **6.3 Испытательный генератор «кабельной инжекции» формы 3 (1 МГц) (единичные удары)**

– условное обозначение – TG-KI-SS-3(1МГц);  
– вид испытательных импульсов – единичные удары;

– частота испытательного напряжения 1 МГц;  
– форма испытательного напряжения 3 (по рис. 3);

– диапазон амплитуд испытательного напряжения от 100 В до 3200 В (5 фиксированных диапазонов);

– внутреннее сопротивление 5 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-КИ-3-1МГц имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **6.4 Испытательный генератор «кабельной инжекции» формы 3 (10 МГц) (единичные удары)**

– условное обозначение – TG-KI-SS-3 (10 МГц);  
– вид испытательных импульсов – единичные удары;

– частота испытательного напряжения 10 МГц;  
– форма испытательного напряжения 3 (по рис. 3);

– диапазон амплитуд испытательного напряжения от 100 В до 3200 В (5 фиксированных диапазонов);

– внутреннее сопротивление – 5 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-КИ-3-10МГц отсутствует в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **6.5 Испытательный генератор «кабельной инжекции» формы 1 (многократные удары)**

– условное обозначение – TG-KI-MS-1;  
– вид испытательных импульсов – многократные удары (рис. 7);

– форма испытательного тока 1 (по рис. 1);  
– диапазон амплитуд испытательных токов 1 удара от 50 А до 1600 А (5 фиксированных диапазонов);

– соотношение амплитуд  $I_1/I_{2-14} - 2$ ;

– внутреннее сопротивление – 1 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-МКУ-1 имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **6.6 Испытательный генератор «кабельной инжекции» формы 2 (многократные удары)**

– условное обозначение TG-KI-MS-2;  
– вид испытательных импульсов – многократные удары (рис. 7);

– форма испытательного напряжения 2 (по рис. 2);

– диапазон амплитуд испытательного напряжения 1 удара от 50 В до 1600 В (5 фиксированных диапазонов);

– внутреннее сопротивление – 1 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-МКУ-2 имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **6.7 Испытательный генератор «кабельной инжекции» формы 3 (1 МГц) (многократные удары)**

– условное обозначение TG-KI-MS-3 (1 МГц);  
– вид испытательных импульсов – многократные удары (рис. 7);

– форма испытательного напряжения 3 (по рис. 3);

– диапазон амплитуд испытательного напряжения 1 удара от 100 В до 3200 В (5 фиксированных диапазонов);

– внутреннее сопротивление – 5 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-МКУ-3-1МГц имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **6.8 Испытательный генератор «кабельной инжекции» формы 3 (10 МГц) (многократные удары)**

– условное обозначение TG-KI-MS-3 (10 МГц);  
– вид испытательных импульсов – многократные удары (рис. 7);

– форма испытательного напряжения 3 (по рис. 3);

– диапазон амплитуд испытательного напряжения 1 удара от 100 В до 3200 В (5 фиксированных диапазонов);

– внутреннее сопротивление – 5 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-МКУ-3-10МГц отсутствует в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **6.9 Испытательный генератор «кабельной инжекции» формы 3 (1 МГц) (многократные вспышки)**

– условное обозначение TG-KI-MB-3 (1 МГц);  
– вид испытательных импульсов – многократные вспышки (рис. 8);

– форма испытательного напряжения 3 (по рис. 3);

– диапазон амплитуд испытательного напряжения от 60 В до 1920 В (5 фиксированных диапазонов);  
– внутреннее сопротивление – 60 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-МВ-3-1МГц отсутствует в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **6.10 Испытательный генератор «кабельной инжекции» формы 3 (10 МГц) (многократные вспышки)**

– условное обозначение TG-KI-MB-3 (10 МГц);  
– вид испытательных импульсов – многократные вспышки (рис. 8);

– форма испытательного напряжения 3 (по рис. 3);

– диапазон амплитуд испытательного напряжения от 60 В до 1920 В (5 фиксированных диапазонов);  
– внутреннее сопротивление – 60 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-МВ-3-10 МГц имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **6.11 Испытательный генератор «кабельной инжекции» формы 6 (многократные вспышки)**

– условное обозначение – TG-KI-MB-6;  
– вид испытательных импульсов – многократные вспышки (рис. 8);

- форма испытательного тока 6 (по рис. 6);
  - диапазон амплитуд испытательного тока от 5 А до 160 А (5 фиксированных диапазонов);
  - внутреннее сопротивление – 20 Ом.
- Такой генератор с названием ИГЛА-МВ-6 отсутствует в ИЛ НИПКИ «Молния».

## **7 Номенклатура и технические характеристики испытательных генераторов для «ввода в заземление»**

### **7.1 Испытательный генератор для «ввода в заземление» формы 4 (единичный удар)»**

- условное обозначение – TG-GI-SS-4;
- вид испытательных импульсов – единичные удары;
- форма испытательного напряжения 4 (по рис. 4);
- диапазон амплитуд испытательного напряжения от 50 В до 1600 В (5 фиксированных диапазонов);
- внутреннее сопротивление – 0,5 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-3В (режим «форма 4») имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **7.2 Испытательный генератор для «ввода в заземление» формы 5А (единичный удар)»**

- условное обозначение – TG-GI-SS-5А;
- вид испытательных импульсов – единичные удары;
- форма испытательного тока 5А (по рис. 5);
- диапазон амплитуд испытательных токов от 150 А до 5000 А (5 фиксированных диапазонов);
- внутреннее сопротивление – 0,33 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-3В (режим «форма 5А») имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **7.3 Испытательный генератор для «ввода в заземление» формы 4 (многократные удары)»**

- условное обозначение – TG-GI-MS-4;
- вид испытательных импульсов – многократные удары (рис. 7);
- форма испытательного напряжения 4 (по рис. 4);
- диапазон амплитуд испытательного напряжения 1 удара от 25 В до 800 В (5 фиксированных диапазонов);
- внутреннее сопротивление – 0,5 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-МКУ-4 имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

### **7.4 Испытательный генератор для «ввода в заземление» формы 5А (многократный удар)»**

- условное обозначение – TG-GI-MS-5А;
- вид испытательных импульсов – многократные удары (рис. 7);
- форма испытательного тока 5А (по рис. 5);
- диапазон амплитуд испытательных токов 1 удара от 60 А до 2000 А (5 фиксированных диапазонов);
- внутреннее сопротивление – 0,33 Ом.

Такой генератор с названием ИГЛА-МКУ-5А имеется в ИЛ НИПКИ «Молния».

## **Выводы.**

1. Для испытаний по стандарту DO-160D в ИЛ НИПКИ «Молния» имеется парк испытательных генераторов из 10 единиц (в одном из них объединены все три вида «контактного ввода», а в другом – два вида единичных ударов «кабельной инъекции») за исключением генераторов ИГЛА-КИ-3-10МГц, ИГЛА-МКУ-3-10МГц, ИГЛА-МВ-3-1МГц, которые находятся в стадии разработки. Все вышеперечисленные генераторы по своим выходным характеристикам полностью удовлетворяют требованиям стандарта DO-160G и могут без переделки применяться для испытаний по этому стандарту.

2. Для доукомплектации парка испытательных генераторов для реализации стандарта DO-160G требуется приобретение генератора ИГЛА-МВ-6.

## **Список литературы:**

1. RTCA/DO-160D, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, prepared by RTCA, dated July 27, 1997.
2. RTCA/DO-160 G, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, prepared by RTCA, dated December 8, 2010. Section 22: Lightning Induced Transient Susceptibility .
3. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («Контактный ввод») ИГЛА-КВ Руководство по эксплуатации ИГЛА-КВ.000.000.000 РЭ.
4. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («Кабельная инъекция», форм 1 и 2) ИГЛА-КИ-1,2 Руководство по эксплуатации ИГЛА-КИ-1,2.000.000.000 РЭ.
5. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («Кабельная инъекция», форма 3) ИГЛА-КИ-3 Руководство по эксплуатации ИГЛА-КИ-3.000.000.000 РЭ.
6. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («Многократные удары») 1 формы ИГЛА-МКУ-1 (G-MS-1) Руководство по эксплуатации ИГЛА-МКУ-1 000.000.000 РЭ.
7. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («Многократные удары») 2 формы ИГЛА-МКУ-2 (G-MS-1) Руководство по эксплуатации ИГЛА-МКУ-2 000.000.000 РЭ.
8. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («Многократные удары») 3 формы частотой 1 МГц ИГЛА-МКУ-3-1 МГц (G-MS-3-

1MHz) Руководство по эксплуатации ИГЛА-МКУ-3-1 МГц.000.000.000 РЭ.

9. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («Многokратные удары») 4 формы ИГЛА-МКУ-4 (G-MS-4) Руководство по эксплуатации ИГЛА-МКУ-4 000.000.000 РЭ.

10. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («Многokратные удары») формы 5А ИГЛА-МКУ-5А (G-MS-5А) Руководство по эксплуатации ИГЛА-МКУ-5А 000.000.000 РЭ.

11. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («Ввод в заземление») Г-ИГЛА-ЗВ Руководство по эксплуатации Г-ИГЛА-ЗВ-000.000.000 РЭ.

12. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («Многokратные вспышки», форма 3, частота 10 МГц) ИГЛА-МВ-10 МГц (G-MB-10MHz) Руководство по эксплуатации ИГЛА-МВ-10 МГц.000.000.000 РЭ.

#### **Bibliography (transliterated):**

1. RTCA/DO-160D, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, prepared by RTCA, dated July 27, 1997.
2. RTCA/DO-160 G, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, prepared by RTCA, dated December 8, 2010. Section 22: Lightning Induced Transient Susceptibility .
3. Generator dlja provedenija ispytanij bortovogo aviacionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («Kontaktnyj vvod») IGLA-KV Rukovodstvo po jekspluatacii IGLA-KV.000.000.000 RJe.
4. Generator dlja provedenija ispytanij bortovogo aviacionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («Kabel'naja inzhekcija», form 1 i 2) IGLA-KI-1,2 Rukovodstvo po jekspluatacii IGLA-KI-1,2.000.000.000

RJe.

5. Generator dlja provedenija ispytanij bortovogo aviacionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («Kabel'naja inzhekcija», forma 3) IGLA-KI-3 Rukovodstvo po jekspluatacii IGLA-KI-3.000.000.000 RJe.

6. Generator dlja provedenija ispytanij bortovogo aviacionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («Mnogokratnye udary») 1 formy IGLA-MKU-1 (G-MS-1) Rukovodstvo po jekspluatacii IGLA-MKU-1.000.000.000 RJe.

7. Generator dlja provedenija ispytanij bortovogo aviacionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («Mnogokratnye udary») 2 formy IGLA-MKU-2 (G-MS-1) Rukovodstvo po jekspluatacii IGLA-MKU-2.000.000.000 RJe.

8. Generator dlja provedenija ispytanij bortovogo aviacionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («Mnogokratnye udary») 3 formy chastotj 1 MGc IGLA-MKU-3-1 MGc (G-MS-3-1MHz) Rukovodstvo po jekspluatacii IGLA-MKU-3-1 MGc.000.000.000 RJe.

9. Generator dlja provedenija ispytanij bortovogo aviacionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («Mnogokratnye udary») 4 formy IGLA-MKU-4 (G-MS-4) Rukovodstvo po jekspluatacii IGLA-MKU-4.000.000.000 RJe.

10. Generator dlja provedenija ispytanij bortovogo aviacionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («Mnogokratnye udary») formy 5А IGLA-MKU-5А (G-MS-5А) Rukovodstvo po jekspluatacii IGLA-MKU-5А. 000.000.000 RJe.

11. Generator dlja provedenija ispytanij bortovogo aviacionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («Vvod v zazemlenie») G-IGLA-ZV Rukovodstvo po jekspluatacii G-IGLA-ZV-000.000.000 RJe.

12. Generator dlja provedenija ispytanij bortovogo aviacionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («Mnogokratnye vspyshki», forma 3, chastota 10 MGc) IGLA-MV-10 MGc (G-MB-10MHz) Rukovodstvo po jekspluatacii IGLA-MV-10 MGc.000.000.000 RJe.

*Поступила (received) 26.03.2018*

#### *Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Немченко Юрій Семенович (Немченко Юрий Семенович, Nemchenko Jurij Semenovich)** – головний метролог, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-68-68; e-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua.

**Лесной Иван Петрович (Лесной Иван Петрович, Lesnoy Ivan Petrovich)** – завідувач лабораторією, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-68-68.

УДК 551.594

**А.А. ПЕТКОВ****ВЕРОЯТНОСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПОРАЖЕНИЙ МОЛНИЕЙ  
НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ СТЕРЖНЕВОГО ТИПА**

В работе показано, что существующая методика определения числа поражений наземных объектов стержневого типа, которая представлена в нормативных документах по молниезащите, требует корректировки. Предложена многошаговая модель поражения наземного стержневого объекта, позволяющая определить вероятность поражения стержня в зависимости от расстояния между осями стержня и высоковольтного электрода. Получены данные для определения функции распределения вероятности поражения стержневого объекта при отношении высоты расположения высоковольтного электрода к высоте стержневого объекта равном  $H/h = 10$  и  $H/h = 20$ . Материалы работы могут быть использованы для дальнейших исследований поражения длинной искрой различных объектов, расположенных на плоской поверхности.

**Ключевые слова:** математическая модель, вероятность поражения, доверительный интервал, разряд длинной искры, функция распределения, стержневой объект.

**О.О. ПЕТКОВ****ІМОВІРНІСНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЧИСЛА УРАЖЕНЬ БЛИСКАВКОЮ  
НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ СТРИЖНЕВОГО ТИПУ**

У роботі показано, що існуюча методика визначення числа уражень наземних об'єктів стрижневого типу, яка представлена в нормативних документах з блискавкозахисту, потребує коректування. Запропоновано багатокрокову модель ураження наземного стрижневого об'єкта, яка дозволяє визначити ймовірність ураження стрижня залежно від відстані між осями стрижня й высоковольтного електрода. Отримано дані для визначення функції розподілу ймовірності ураження стрижневого об'єкта при відношенні висоти розташування высоковольтного електрода до висоти стрижневого об'єкта рівному  $H/h = 10$  та  $H/h = 20$ . Матеріали роботи можуть бути використані для подальших досліджень ураження довгою іскрою різних об'єктів, розташованих на плоскій поверхні.

**Ключові слова:** математична модель, ймовірність ураження, довірчий інтервал, розряд довгої іскри, функція розподілу, стрижневий об'єкт.

**А.А. ПЕТКОВ****PROBABILISTIC DETERMINATION OF THE NUMBER OF LIGHTNING DEFEAT  
IN GROUND-BASED ROD-TYPE OBJECTS**

*Purpose.* Improvement of the procedure for determining the expected number of lightning lesions of rod-type objects in the probabilistic formulation of the problem. *Methodology.* Mathematical modeling of the probability of affection of a rod object located on the surface of a ground, using a multi-step model of motion of a long spark, the variational coefficients of which are determined from the results of physical experiments. *Description of data* by methods of probability theory and mathematical statistics. *Results.* The probability distribution functions of the impact of the core object are determined. It is shown that the existing norms for determining the lightning capture zone give an underestimate. *Originality.* The method of determining the zone of capture of lightning by objects of the rod type has been further developed. *Practical value.* Based on the calculations carried out, it is proposed to correct the existing regulatory documents on the protection of buildings and structures against direct lightning.

**Keywords:** mathematical model, probability of defeat, confidence interval, long spark discharge, distribution function, core object.

**Введение**

Согласно ряду национальных и международных нормативных документов целесообразность и уровень защиты от прямого поражения молнией наземных объектов определяются в первую очередь ожидаемым количеством поражений этих объектов молнией в течение года. Определение ожидаемого количества поражений базируется на том, что каждый объект «стягивает» разряды молнии с некоторого объема окружающего его пространства («область захвата»).

В международном нормативном документе [1], ожидаемое количество поражений сосредоточенных объектов стержневого типа (дымовые трубы, башни и

т.п. см. рис. 1) в течение года  $N$  может быть определено по следующей формуле:

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

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

Ожидаемое количество поражений  $N$ , определенное по (1), основывается на том положении, что стержневой объект «стягивает» разряды молний с некоторого объема пространства, проекция которого на поверхность грунта представляет собой круг («круг

© А.А. Петков, 2018



стягивания») с центром на пересечении с осью стержня и радиусом  $r = 3h$ .

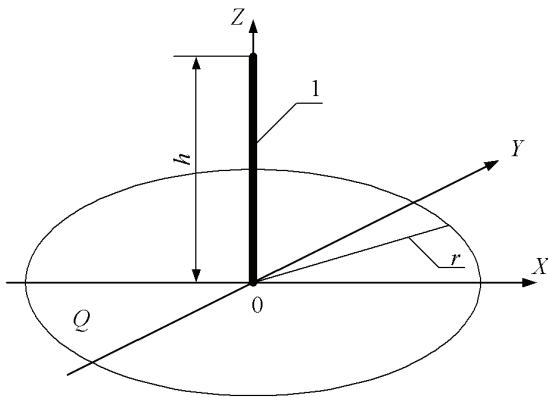


Рисунок 1 – «Круг стягивания» объектов стержневого типа:  
1 – стержневой объект

В [2] приведены результаты имитации молнии разрядом длинной искры с высоковольтного электрода на одиночный стержень (см. рис. 2). В работе указывается, что при смещении высоковольтного электрода в горизонтальном направлении вплоть до расстояния между осями высоковольтного электрода и стержня  $R = 3,5h$  все разряды длинной искры поражают стержневой объект, а при большем радиусе часть разрядов попадает в землю. Таким образом, на основании указанных данных можем сделать вывод, что радиус «круга стягивания» (см. рис. 1) превышает  $r > 3,5h$  для условий описанного эксперимента.

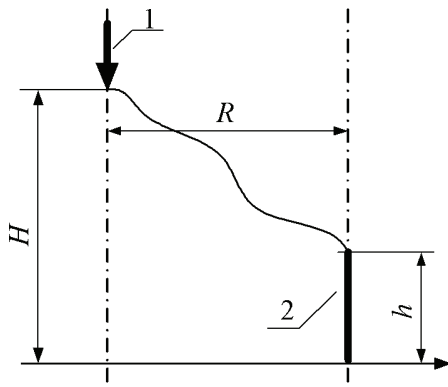


Рисунок 2 – Схема имитационных испытаний поражения стержневого объекта разрядом молнии:  
1 – высоковольтный электрод, 2 – стержневой объект

Однако в [3] на основании проведенных имитирующих молнию экспериментов, аналогичных [2], показано, что в ряде случаев ( $H = 10$  и  $15$  м и отношения  $H/h = 5$  и  $10$ ) вероятность поражения стержня гораздо меньше 1 даже при соосном расположении высоковольтного электрода и стержня.

Приведенные факты показывают несогласованность данных различных источников и являются основой для дальнейших исследований.

**Целью работы** является усовершенствование процедуры определения ожидаемого количества поражений молнией объектов стержневого типа в вероятностной постановке задачи.

### Основные материалы исследований

Зависимость вероятности поражения стержневого объекта от расстояния между осями объекта и высоковольтного электрода, которая была исследована во многих работах, дает оценку единичного акта поражения при условии, что финальный разряд длинной искры, поражающий стержневой объект, развивается с конкретной точки, определяемой условиями эксперимента. В реальной ситуации финальный разряд может развиваться из любой точки пространства, находящейся в «зоне захвата».

Произведем определение вероятности поражения стержневого объекта в предположении, что точки начала финального разряда, поражающего стержневой объект высотой  $h$ , равномерно распределены в плоскости, параллельной «кругу стягивания» на высоте  $H$  над поверхностью грунта.

Для решения задачи воспользуемся данными результатов испытаний [4], проведенных по схеме, показанной на рис. 2.

Экспериментальные данные [4], которые используются в данной работе, были получены при ограниченном количестве опытов и при увеличении количества разрядов наблюдаемые значения вероятности поражения стержневых объектов  $p^*$  могут измениться. Для учета этого факта при дальнейшем рассмотрении для каждого экспериментального значения вероятности поражения стержневых объектов  $p^*$  в соответствии с методикой, описанной в [5, 6], был определен доверительный интервал для вероятности поражения стержня ( $p_1, p_2$ ) при доверительной вероятности  $\beta = 0,99$ . Графики изменения вероятности поражения стержневых объектов показаны на рис. 3 и рис. 4.

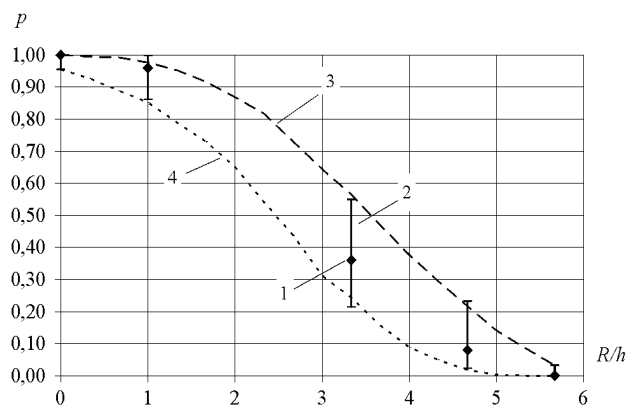


Рисунок 3 – Изменение вероятности поражения стержневых объектов при  $h = 0,3$  м и  $H = 3$  м в зависимости от расстояния до точки начального движения финального разряда (начала ориентировки длинной искры)

На рисунках обозначено: 1 – наблюдаемые в эксперименте значения вероятности поражения стержневых объектов  $p^*$ , 2 – доверительный интервал для

значений вероятности поражения стержневых объектов.

Как видно из рис. 3, при  $h = 0,3$  м и  $H = 3$  м имеет место поражение стержневого объекта при соотношении  $R/h \leq 5,67$ . Графики, приведенные на рис. 4, показывают, что при  $h = 0,15$  м и  $H = 3$  м имеет место поражение стержневого объекта при соотношении  $R/h \leq 8,67$ .

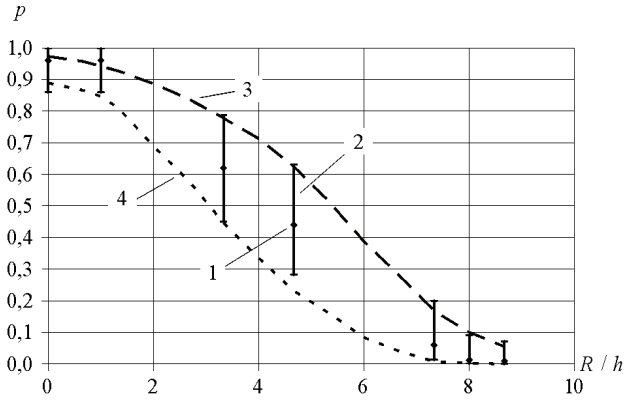


Рисунок 4 – Изменение вероятности поражения стержневых объектов при  $h = 0,15$  м и  $H = 3$  м в зависимости от расстояния до точки начального движения финального разряда (начала ориентировки длинной искры)

Имеющиеся экспериментальные данные в количественном плане ограничены, а для корректного решения поставленной задачи необходимы промежуточные значения.

Для построения промежуточных точек зависимости (верхняя граница график 3 и нижняя граница график 4) была использована модернизированная многошаговая модель, которая применялась в [7, 8]. Модернизация использованной многошаговой модели, геометрическая интерпретация которой показана на рис. 5, заключалась в учете механизма случайного равномерного движения длинной искры в направлении поражаемого объекта.

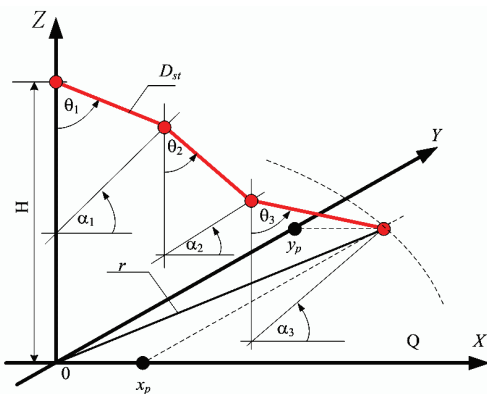


Рисунок 5 – Геометрическая интерпретация многошаговой модели движения длинной искры

Как видно из рис. 5, движение длинной искры на каждом шаге определяется углом движения  $\theta$  (в вер-

тикальной плоскости) и углом ориентировки  $\alpha$  (в горизонтальной плоскости). В модернизированной модели принято, что вероятность появления угла движения  $\theta$  обратно пропорциональна расстоянию от начала движения искры до поражаемого объекта  $\sim 1/D^m$ , где  $m$  – числовой коэффициент. Модернизированная модель содержит два механизма определения угла движения  $\alpha$ . По первому механизму вероятность появления угла движения  $\alpha$  обратно пропорциональна расстоянию от начала движения искры до оси стержневого объекта (см. рис. 6) и определяется исходя из функции распределения угла  $\alpha$  (базовый вариант)

$$F(\alpha) = \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha} \frac{d\alpha}{r_{cp}^m}}{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{d\alpha}{r_{cp}^m}}, \quad \alpha \in [\alpha_1, \alpha_2]. \quad (2)$$

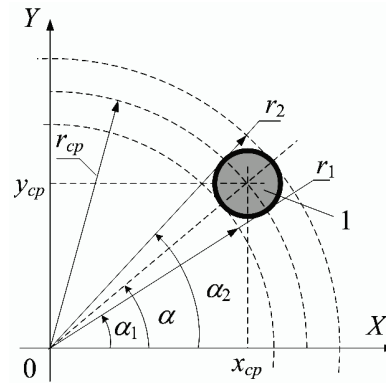


Рисунок 6 – Определение угла ориентировки длинной искры: 1 – проекция стержневого объекта на плоскость XOY

По второму механизму движения длинной искры угол ориентировки  $\alpha$  определяется исходя из его равномерного распределения в интервале  $[0, 2\pi)$ . Физической основой данного механизма может служить случайный характер движения лавин, которые подпитывают длинную искру в процессе ее прорастания.

Учет механизма равномерного распределения угла ориентировки  $\alpha$  произведем, используя следующий коэффициент.

$$K_\alpha = N_1 / N_2, \quad (3)$$

где  $K_\alpha$  – коэффициент равномерного распределения угла  $\alpha$ ;  $N_1$  – число итераций имитационного эксперимента, при которых распределение угла  $\alpha$  принималось равномерно распределенным в интервале  $[0, 2\pi)$ ;  $N_2$  – общее число итераций имитационного эксперимента.

Каждая итерация из  $N_1$  реализовывалась в случайном порядке. Генерировалось число  $S$ , равномерно распределенное в интервале  $[0, 1)$ . Если выполнялось условие  $S \leq K_\alpha$ , то реализовывался механизм случайного угла ориентировки  $\alpha$ . В противном случае реализовывался базовый вариант распределения угла ори-

ентировки  $\alpha$ .

Таким образом, используя данные промежуточных значений, показанных на рис. 3 и рис. 4, можем построить функцию распределения вероятности поражения стержневого объекта, которая определяет вероятность поражения стержневого объекта разрядом длиной искры в случае, если начальная точка финального разряда располагается в «круге стягивания»  $r < r_0$

$$Q(r_0) = \frac{\int_0^{r_0} 2\pi r p(r) dr}{\int_0^{\infty} 2\pi r p(r) dr}, \quad (4)$$

где  $p(r)$  – зависимости вероятности поражения стержневого объекта от расстояния между осями стержня и высоковольтного электрода, показанные на рис. 3 и рис. 4.

Результаты проведенных расчетов по (4) показаны на рис. 7 и рис. 8.

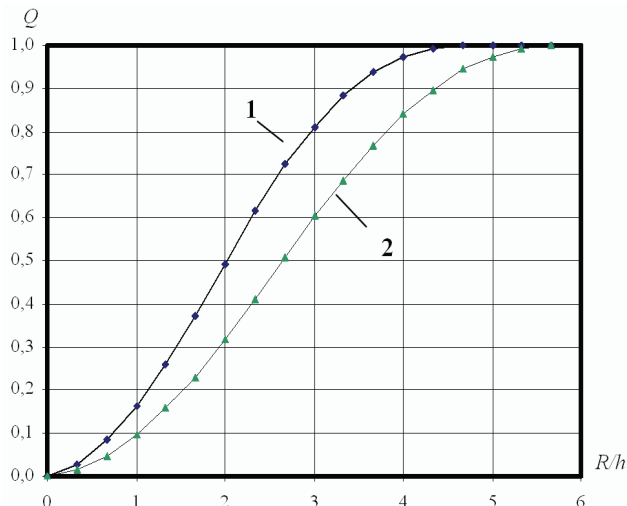


Рисунок 7 – Функция распределения вероятности поражения стержневых объектов при  $h = 0,3$  м и  $H = 3$  м:  
1 – верхнее значение, 2 – нижнее значение

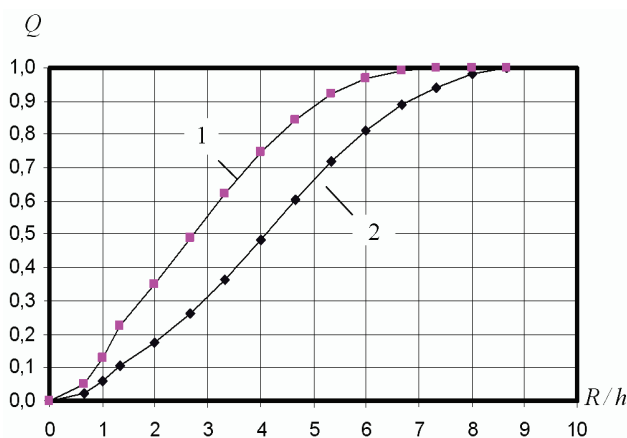


Рисунок 8. Функция распределения вероятности поражения стержневых объектов при  $h = 0,15$  м и  $H = 3$  м:  
1 – верхнее значение, 2 – нижнее значение

Как видно из рисунков, при условиях, определяемых по (1) ( $r = 3h$ ) вероятность захвата молний стержневым объектом находится в диапазоне 0,6 – 0,8 (при  $h = 0,3$  м и  $H = 3$  м) и 0,31 – 0,56 (при  $h = 0,15$  м и  $H = 3$  м). Таким образом, существенная часть молний, которые могут поразить объект, не учитывается при расчете по выражению (1).

Понятно, что в работе рассмотрены частные случаи поражения стержневых объектов, однако [1] является обобщающим нормативным документом и должен, каким-либо образом, учитывать и эти частные случаи. Разработчики национального нормативного документа [9], который содержит ту же норму (1), предусмотрели возможность, по желанию заказчика, закладывать при проектировании молниезащиты более жесткие параметры. Предложенные в работе материалы могут служить основанием для их применения.

**Выводы.** В работе показано, что существующая методика определения числа поражений наземных объектов стержневого типа, которая представлена в нормативных документах по молниезащите, требует корректировки. Предложена многошаговая модель поражения наземного стержневого объекта, позволяющая определить вероятность поражения стержня в зависимости от расстояния между осями стержня и высоковольтного электрода. Получены данные для определения функции распределения вероятности поражения стержневого объекта при отношении высоты расположения высоковольтного электрода к высоте стержневого объекта равном  $H/h = 10$  и  $H/h = 20$ . Материалы работы могут быть использованы для дальнейших исследований поражения длиной искрой различных объектов, расположенных на плоской поверхности.

#### Список литературы:

1. IEC 62305-2, Ed. 1: Protection against lightning – Part 2: Risk management. – IEC, 2004. – 95 p.
2. Кужекин И.П. Молния и молниезащита / И.П. Кужекин, В.П. Ларионов, Е.Н. Прохоров. – М.: Знак, 2003. – 330 с.
3. Александров Г.Н. Об ориентировке канала длиной искры / Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, Э.М. Базелян, Е.С. Садыхова // Электричество. – 1973. – №3. – С. 63-66.
4. Баранов М.И. Экспериментальные исследования поражения заземленной плоскости и размещенных на ней объектов электрическим разрядом в длинном промежутке / М.И. Баранов, В.И. Доценко, В.М. Зиньковский и др. // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – №27. – С. 11-20.
5. Korn, G. Mathematical handbook for scientists and engineers / G. Korn, T. Korn. – N.-Y.: McGraw-Hill Book Company, 1968. – 832 p.
6. Hauschild V. Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik / V. Hauschild, V. Mosch. – Berlin: VEB Verlag Technik, 1984. – 312 s.

7. Петков А.А. Моделирование поражения плоскости разрядом длинной искры с использованием многошаговой модели / А.А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – №51. – С. 78 – 82.
8. Петков А.А. Моделирование поражения стержня разрядом длинной искры с использованием многошаговой модели / А.А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – №14. – С. 73-77.
9. ДСТУ Б В.2.5-38:2008. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд (IEC 62305:2006, NEQ): – Нац. стандарт України. – К.: Мінорегіонбуд України, 2008. – 63 с.

#### References(transliterated):

1. IEC 62305-2, Ed. 1: Protection against lightning – Part 2: Risk management. IEC, 2004. 95 p.
2. Kuzhekin I.P., Larionov V.P., Prohorov E.N. Molniya i molniezaschita [Lightning and lightning protection]. Moscow: Znack Publ., 2003. 330 p.
3. Aleksandrov G.N., Ivanov V.L., Bazelyan E.M., Sadyhova E.S. Ob orientirovke kanala dlinnoy iskry [On the orientation of the channel of a long spark]. Elektrichestvo. 1973, no. 3. P. 63-66.
4. Baranov M.I., Docenko V.I., Zinkovskiy V.M., Koliushko G.M., Nedzelskiy O.S., Petkov A.A., Ponuzhdaeva E.G., Rudenko S.S., Cehmistro V.L. Eksperimentalnye issledovaniya porazheniya zazemlennoy ploskosti i razmeschennyh na ney obektov elektricheskim razryadom v dlinnom promezhutke [Experimental studies of the destruction of an earthed plane and objects placed on it by an electric discharge in a long gap].

- Visnik NTU "KhPI". Zbirnik naukovih prac. Tematichniy vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltages] Kharkiv, NTU "KhPI", 2013, no.27. P. 11-20.
5. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientists and engineers. N.Y.: McGraw-Hill Book Company, 1968. 832 p.
6. Hauschild V., Mosch V. Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik. Berlin.: VEB Verlag Technik, 1984. 312 p.
7. Petkov A.A. Modelirovanie porazheniya ploskosti razryadom dlinnoy iskry s ispolzovaniem mnogoshagovoy modeli [Simulation of plane damage by a long spark discharge using a multistep model]. Visnik NTU "KhPI". Zbirnik naukovih prac. Tematichniy vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltages] Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no.51. P. 78-82.
8. Petkov A.A. Modelirovanie porazheniya sterzhnya razryadom dlinnoy iskry s ispolzovaniem mnogoshagovoy modeli [Simulation of rod damage by discharge of a long spark using a multistep model]. Visnik NTU "KhPI". Zbirnik naukovih prac. Tematichniy vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltages] Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2016, no.14. P. 73-77.
9. DSTU B V.2.5-38:2008. Ulashtuvannya bliskavkozahistu budivvel i sporud (IEC 62305:2006, NEQ) [State Standard B V.2.5-38:2008. Device lightning protection of buildings and constructions]. Kyiv, Ministry of Regional Construction Publ., 2008. 63 p.

Поступила (received) 22.03.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Петков Олександр Олександрович (Петков Александр Александрович, Petkov Alexander Alexandrovich)** – доктор технічних наук, доцент, НТУ «ХПІ», професор кафедри інженерної електрофізики; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0101-0089>; e-mail: alexpetkov2014@gmail.com

*С.А. ХАЙНАЦКИЙ, А.И. ХРИСТО, Л.П. ШВЕДОВ*

### ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ

Рассмотрены методы очистки воды от биологических и химических загрязнений, связанные с различными типами электрических разрядов и режимов работы. Обсуждаются достоинства и недостатки различных электроразрядных методов очистки применительно к конкретным видам загрязнений, их энергоэффективность и перспективы промышленного применения. Показано, что тип разряда в одной и той же системе может зависеть как от электротехнических параметров разрядной цепи, так и от геометрических, совокупность которых определяет характер развития разряда, что в свою очередь, влияет на особенности протекания реакций в жидкости. Обсуждается дальнейшая оптимизация этой технологии.

**Ключевые слова:** электроразряд, нетепловая плазма (NTP), диэлектрический барьерный разряд (DBD), очистка сточных вод, энергетическая эффективность, производство озона, оксиды азота, электрический пробой, источники плазмы, плазма атмосферного давления.

*С.О. ХАЙНАЦКИЙ, О.І. ХРИСТО, Л.П. ШВЕДОВ*

### ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНІ МЕТОДИ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ

Розглянуто методи очищення води від біологічних і хімічних забруднень, пов'язані з різними типами електричних розрядів і режимів роботи. Обговорюються переваги і недоліки різних електророзрядних методів очищення стосовно конкретних видів забруднень, їх енергоефективність і перспективи промислового застосування. Показано, що тип розряду в одній і тій же системі може залежати як від електротехнічних параметрів розрядного ланцюга, так і геометричних, сукупність яких визначає характер розвитку розряду, що в свою чергу, впливає на особливості протікання реакцій в рідині. Обговорюється подальша оптимізація цієї технології.

**Ключові слова:** електророзряд, нетеплова плазма (NTP), діелектричний бар'єрний розряд (DBD), очищення стічних вод, енергетична ефективність, виробництво озону, оксиди азоту, електричний пробій, джерела плазми, плазма атмосферного тиску.

*S.A.KHAINATSKYY, O.I. KHRYSTO, L.P. SHVEDOV*

### ELECTRIC DISCHARGE METHODS OF WATER TREATMENT

This paper presents advanced water purification oxidative methods capable of decomposing toxic compounds into smaller molecules with possible full mineralization up to CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O. Electrical discharge plasma contact with water occupies a promising position among the advanced oxidation methods, since such a mechanism allows the generation of a wide range of oxidizing particles in the immediate vicinity of treated liquid. Water purification is a technology that has been extensively studied for many types of thermal and non-thermal plasma, such as electro hydraulic discharges, dielectric barrier discharges (DBD), plasma corona jet, floating sliding arcs, etc.

Methods of water purification from biological and chemical pollution associated with various types of electrical discharges and operating modes are considered. The advantages and disadvantages of various electrical discharge purification methods for specific types of pollution, their energy efficiency and commercial application prospects are discussed. It is shown that the type of discharge in the same system can depend both on the electrical and technical parameters of the discharge circuit and on the geometric ones, the totality of which determines the nature of discharge development that in turn affects the features of reactions course in the liquid. Further optimization of this technology is discussed, which is a very complicated task due to the large number of discharge chambers design variants, various electrode systems materials, and discharge types.

**Keywords:** electric discharge, non-thermal plasma (NTP), dielectric barrier discharge (DBD), wastewater treatment the energy effectiveness, ozone production, nitrogen oxides, electrical breakdown, plasma sources, atmospheric pressure plasma.

#### Введение.

Непрерывный рост мирового водопотребления при существенно неравномерном распределении водных ресурсов по регионам приводит к возникновению острого дефицита пресной воды в целом ряде стран. Более половины всей используемой в мире пресной воды (63 %) расходуется безвозвратно, особенно в сельском хозяйстве. В Украине, как стране, у которой сельское хозяйство является одной из главных отраслей экономики, «благодаря» агрессивным технологиям, активно внедряемым в сельском хозяйстве, положение с водными ресурсами в настоящее время стано-

вится близким к катастрофическому. Существенный вклад в эту проблему вносит также практически бесконтрольный сброс сточных вод промышленными предприятиями.

В целом по запасам водных ресурсов из расчета на единицу площади и на одного жителя Украина занимает одно из последних мест в Европе. В количественном выражении, в пересчете на одного жителя страны, запасы пресной воды приблизительно в 8 раз меньше среднемировых. Несмотря на то, что водные ресурсы являются возобновляемыми, качество воды в них постоянно ухудшается. Естественные системы

очистки вод уже давно не справляются со своими задачами. По данным исследований, проведенных еще в 2011 году, большинство наших рек относят к III – IV классу качества вод (этот класс определяется как загрязненные воды). По качеству питьевой воды, в соответствии с данными ЮНЕСКО, Украина занимает последнее место в Европе, уступая по этим показателям многим странам Африки. Поэтому проблема очистки сточных вод и предотвращения дальнейшего загрязнения водоемов становится чрезвычайно актуальной в настоящее время.

К основным загрязняющим воду веществам принадлежат нефтепродукты, фенолы, азот аммонийный и нитратный, тяжелые металлы и органические вещества. Все сточные воды очищаются от примесей механическими, химическими, физико-химическими, биохимическими и термическими методами [1]. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, целесообразность применения каждого из них в конкретной ситуации определяется большим количеством различных факторов. Например, наиболее распространенным методом очистки гальванических стоков в настоящее время является реагентный (химический), основанный на реакциях нейтрализации и окисления – восстановления [2]. К его достоинствам можно отнести большую производительность линий очистки и малое энергопотребление, к недостаткам – невысокую эффективность (в растворе остается более 10% солей тяжелых металлов) и невозможность использовать полученную воду в обороте из-за повышенного общего соледержания.

В настоящее время среди новых технологий по очистке и обеззараживанию воды наиболее перспективными являются окислительные фотохимические технологии, объединенные термином Advanced Oxidation Processes (AOP), включающие методы одновременного воздействия УФ-излучения и естественных для природной среды окислителей. Примерами передовых окислительных процессов являются озонирование, добавление перексид водорода, процесс Фентона, ультрафиолетовое облучение, радиолиз, микроволновая обработка, субкритическое окисление влажного воздуха, электрохимическое окисление, гомогенное и гетерогенное каталитические окисления, ультразвуковое воздействие и его комбинации, такие как пероксонирование, фотокатализ, и электрофентонный процесс.

К технологиям AOP относятся и технологии, использующие электрический разряд, в процессе которого одновременно комплексно реализуется воздействие на среду некоторых из перечисленных выше процессов. В последнее время электроразрядные технологии очистки воды интенсивно изучаются во многих странах. Электроразрядные методы являются безреагентными, при этом степень очистки сточных вод от различных загрязнителей существенно превышает уровни, достижимые другими методами. Еще одним существенным достоинством электроразрядного метода является возможность возврата в оборот большого количества воды после очистки. Используются различные виды разряда: искровой разряд, анодный мик-

роразряд, тлеющий, коронный, дуговой, скользящий, барьерный, диафрагменный, капиллярный разряды, реализуемые как в импульсном режиме, так и при постоянном токе. При этом в публикациях представлены результаты исследований различных способов реализации электрического разряда: в очищаемой воде, над водой (разряд с «жидким анодом» или катодом, скользящий разряд), в водо-воздушной среде, в гетерогенных средах (например, разряд в металлической загрузке).

Целью этой работы является, на примере некоторых электроразрядных методов очистки воды от различных загрязнителей различными видами разряда и в разных средах, определить современные тенденции их развития и перспективы промышленного использования.

**Искровой разряд в воде.** Метод очистки и обеззараживания сточных вод с помощью электрического разряда в жидкости впервые был предложен известным изобретателем Л.А. Юткиным [3]. В [4,5] показано, что подводным разрядом может быть очищена как питьевая, так и сточная вода. Однако, поскольку основным недостатком линейного искрового разряда в жидкости (в литературе его называют «электрогидравлический разряд») является низкая эффективность использования энергии – лишь часть затраченной энергии оказывается эффективной при удалении целевых загрязнений [5] – широкого применения этого вида разряда в промышленной очистке воды вряд ли стоит ожидать. Тем не менее, появление работ Юткина стимулировало развитие исследований в этом направлении.

**Импульсный коронный разряд в жидкости.** Определенный прогресс в развитии методов электроразрядной очистки воды можно связать с развитием представлений об импульсном коронном разряде в воде [6,7]. По своей природе это незавершенный искровой разряд с сильно разветвленной системой плазменных каналов, по своей форме напоминающих корону в атмосфере (рис. 1, а). Условиями возникновения такого разряда являются высокая электропроводность электролита, высокая напряженность резко неоднородного поля, удаленность противоиэлектрода и неравенство площадей поверхности электродов. В зависимости от условий реализации этого разряда, на аноде может формироваться сплошное плазменное образование, полностью повторяющее форму электрода [8]. На рисунке 1 б приведена фотограмма протяженного коронного разряда из этой работы. Такое свойство коронного разряда в жидкости удобно для создания электроразрядных устройств для очистки воды, имеющих максимально возможные области соприкосновения плазмы разряда и обрабатываемой жидкости. В работах [6,7] определены условия формирования импульсных коронных разрядов со сплошным плазменным образованием в воде, и предложены принципы создания устройств для очистки воды от органических и биологических загрязнений. Формирование относительно большого объема плазмы раз-

ряда заданной конфигурации, непосредственно контактирующего с водой, создает хорошие условия для воздействия всех факторов разрядной плазмы на биологические и химические загрязнители. По данным работы [7], исходная вода с высокими концентрациями поверхностно-активных веществ (ПАВ), фенолов и бактерий, после обработки электроразрядным методом с многофакельной короной была очищена до норм ПДК для питьевой воды. Учитывая, что в про-

цессе обработки воды импульсной короной создаются высокие концентрации химически активных частиц, обладающих высокой окислительной способностью, можно также рассчитывать на то, что этот метод, возможно вместе с другими методами, пригоден и для очистки усредненных промышленных сточных вод, содержащих также ионы тяжелых металлов и другие загрязнители.

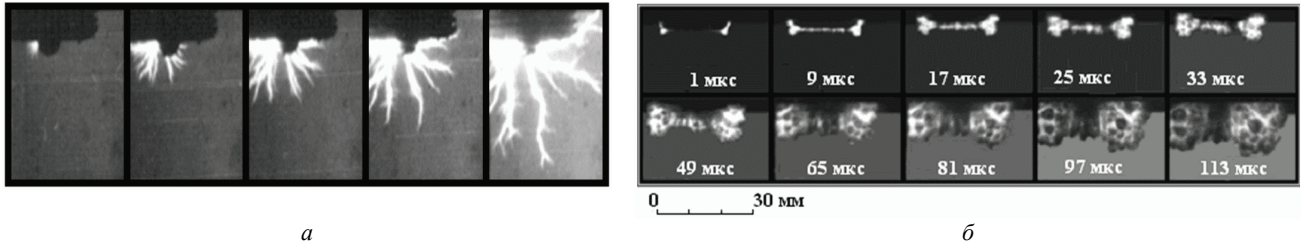


Рисунок 1 – Фрагменты типичных скоростных фотোগрамм импульсного коронного разряда в воде:

*а* – разряд в системе +острие – плоскость;

*б* – фотограмма развития протяженного коронного разряда на торце плоской металлической пластины [8]

**Искровой разряд в жидкости в реакторах с металлозагрузкой.** Исследования электрофизических технологических аспектов электрического разряда в реакторах с гранулированной металлической загрузкой развиваются в основном с целью нахождения оптимальных параметров для получения ультрадисперсных порошков различных металлов методом объемного электроискрового диспергирования. На рис. 2 [9] представлены отдельные кадры скоростной фоторегистрации динамики разрядной плазмы искрового разряда между алюминиевыми гранулами в воде. В зависимости от электрических параметров импульса, реактора и гранул металла между соседними гранулами происходит искровой пробой, и в слое гранул формируется один или несколько каналов сквозной проводимости. Развивающийся в каждом искровом промежутке (между гранулами) плазменный канал (см. рис. 2) приводит к диспергированию металла гранул и выносу микрочастиц металла в окружающую жидкую среду. Эти частицы не покрыты оксидными пленками, имеют высокую удельную поверхность, поэтому до момента их пассивации, обладая высокой химической активностью, участвуют в ряде превращений. Регулируя состав загрузки, можно таким образом насыщать воду адсорбентами, флокулянтами и коагулянтами для очистки воды от вредных примесей. Это один из аспектов, делающих применение метода для очистки воды привлекательным.

Но основными агентами очистки являются химически активные частицы, генерируемые разрядом плазмы при взаимодействии с водой. Это обладающие высокой окислительной способностью пероксид водорода ( $H_2O_2$ ), атомарный кислород ( $O^*$ ), гидроксил-радикал ( $HO^*$ ), гидропероксид-радикал ( $HO_2^*$ ), озон ( $O_3$ ). Возникает при разряде также ряд дополнительных физических факторов воздействия на обрабатываемые системы – УФ-излучение, ударные волны и активные радикалы. При этом сам метод электроискровой обработки воды в реакторах с металлической загрузкой

легко масштабируется и позволяет регулировать объем плазмы, контактирующей с очищаемой водой.

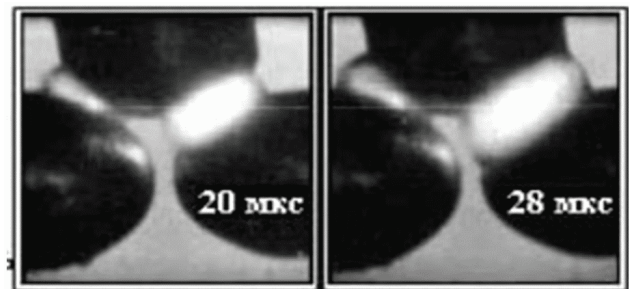


Рисунок 2 – Фрагмент фотограммы разряда в воде между металлическими гранулами алюминия в плоском слое [9]

Возможность очистки воды от ионов тяжелых металлов методом электроискровой обработки в реакторах с металлической загрузкой рассматривалась в [10, 11]. Параметры разрядного контура, промежутка и гранул подбираются так, чтобы при подаче импульса напряжения на электроды в контактах между гранулами возникал низковольтный пробой с последующим образованием канала сквозной проводимости. В работах [10, 11] напряжение, подаваемое на промежуток, относительно небольшое: 300 – 600 В, соответственно линейные размеры камеры не могут превышать 10 см. Результаты работ подтверждают возможность очистки воды от ионов тяжелых металлов этим методом. Однако концентрации очищаемых растворов в этих работах невелики, как и производительность, а кроме того довольно высокие удельные энергозатраты. Это свидетельствует о необходимости проведения дальнейших исследований для нахождения оптимальных параметров обработки.

Результаты комплексных исследований процессов, происходящих при высоковольтной очистке гальваносток в реакторах с металлозагрузкой, изложены в [12-15]. С целью интенсификации процесса очистки

гальваностоков с использованием электроразрядных коагулянтов в [12] изучено влияние различных типов реакторов на свойства получаемых гидроксидов металлов (алюминия и железа), а также природы и концентрации солей, содержащихся в гальваностоках, на седиментационные характеристики гидроксидов. Исследования показывают, что размер частиц электроразрядных гидроксидов алюминия и железа в основном определяется энергией в импульсе и мало зависит от количества импульсов, геометрической формы разрядной камеры, массы и толщины слоя загрузки. Также было показано, что увеличение мощности импульса путем уменьшения его длительности увеличивает дисперсность эродируемых частиц, уменьшает длительность отдельного искрения и устраняет свариваемость между гранулами. При этом размеры образующихся частиц гидроксида железа в некоторых случаях в 2-4 раза превышают аналогичные значения для гидроксида алюминия. Добавление солей металлов в рабочую среду при получении электроразрядного гидроксида алюминия увеличивает примерно от 2 до 3 раз размер его частиц по сравнению с чистой водной средой.

Характер зависимости величины эрозионного съема металлов при высоковольтном объемном искровом разряде в реакторе с гранулированной алюминиевой и железной металлозагрузкой от параметров разрядного контура и размеров реактора и загрузки исследован в [13]. В работе показано, что характер зависимостей удельных энергозатрат на эрозию единицы массы металла загрузки и массы эродировавшего металла для разряда в реакторах с алюминиевой и железной металлозагрузкой практически идентичен, и отличается только количественно. Установлено также, что зависимость этих параметров съема металла может иметь экстремумы при изменении высоты и ширины слоя загрузки.

В статьях [14-15] представлены экспериментальные результаты исследований комплексной очистки воды от ионов тяжелых металлов при высоковольтных электрических разрядах в реакторах с гранулированной металлозагрузкой. Первая часть работы [14] посвящена экспериментальному исследованию особенностей очистки модельных растворов хрома, меди, никеля и цинка различных концентраций в реакторах с алюминиевой и железной загрузкой. Определены зависимости степени очистки растворов от суммарного количества введенной энергии, предельные концентрации растворов, поддающихся очистке, времени обработки растворов до норм ПДК от запасенной энергии. Для каждого из металлов определены механизмы очистки и предельные концентрации растворов, доступные для очистки этим методом.

Во второй части работы ([15]) приведены результаты комплексной обработки реальных гальваностоков с высокой концентрацией ионов различных тяжелых металлов. Проведенное в [15] сравнение энергозатрат в процессе очистки гальваностоков при высоковольтных (3 – 15 кВ) электрических разрядах в реакторах с гранулированной металлозагрузкой с затратами в

электрокоагуляторах или при низковольтном разряде [10,11] показывает, что в первом случае они значительно ниже. Найдены режимы полной очистки высококонцентрированных хромсодержащих стоков, значительно превосходящие по эффективности аналогичные для модельных растворов. Определено, что необходимая степень очистки гальваностоков от ионов тяжелых металлов достигается без фильтрования обработанного разрядом раствора.

В работе [16] уточняются механизмы удаления ионов хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) из водного раствора при электрическом разряде в реакторе с железной и алюминиевой загрузкой. Параметры контура использовались следующие: напряжение от  $U = 500$  до  $1000$  В; максимальный ток  $I = 250\text{--}400$  А; энергия в импульсе  $E = 0,5$  Дж; частота следования импульсов  $f = 300$  Гц. Наибольший интерес, на наш взгляд, представляет установленная в работе зависимость выхода восстановления хрома (VI) от pH раствора: он практически не зависит от pH в диапазоне  $\text{pH} > 3,5$  и резко увеличивается при  $\text{pH} < 3,5$ . Обращает на себя также установленная в работе величина затрат энергии на очистку сточных вод от ионов  $\text{Cr}(\text{VI})$ : при концентрации  $C_{\text{Cr}} = 300$  мг/л она составляет около  $1,5$  МДж/м<sup>3</sup>. На сегодняшний день это наименьшее значение из всех известных результатов.

В [17] исследованы механизмы взаимодействия продуктов электроискрового диспергирования железа и алюминия с различными органическими соединениями в процессе разряда и после отключения источника. В работе показано, что во время разряда основным процессом являются окислительно-восстановительные реакции, при этом их эффективность зависит от материала загрузки (применение железа предпочтительней). Также установлено, что в зависимости от состава и структуры органических соединений, к деградации их молекул в процессе и после разряда приводят различные процессы и реакции (тепловые процессы, окислительно-восстановительные реакции, адсорбция).

Результаты изучения комплекса физических и химических процессов в природных водах, содержащих гуминовые вещества под воздействием импульсных электрических разрядов в слое железных гранул представлены в работах [18, 19]. В [18] для определения степени очистки воды в процессе обработки в работе использовали модельные растворы гумата натрия. Показано, что наиболее интенсивное снижение цвета происходит во время обработки, равное 10 секундам, при этом активные процессы в среде продолжают в течении 1 часа после отключения разряда. В [19] исследовано влияния явлений, инициируемых каналами разряда, и вторичных окислительно-восстановительных процессов на устойчивость гуминовых веществ в грунтовых водах. В работе установлено, что процесс очистки воды с предельной стадией гуминовых веществ при искрообразовании в слое гранул железа представляет собой комплекс процессов, включающий образование коллоидных частиц оксигидроксида железа, сорбцию и коагуляцию вместе с веществ-



вами гуминовых макромолекул, рост дисперсной фазы частиц и осаждение. Подтверждено, что время контакта активных продуктов эрозии с гуматом натрия составляет 1 час. В это время значение перманганатного окисления достигает максимально допустимой концентрации, а концентрация железа в растворе достигает предельно допустимой концентрации после фильтрации.

Определенный интерес для прогресса дальнейших исследований разряда в гетерогенных средах может представлять работа [20], в которой исследуется низковольтный дуговой разряд в жидкости с частотой 100 Гц, энергией 48 мДж и длительностью 20 мкс. В ней определялась эрозия электродов при очистке метилена голубого в концентрации 10 мг на литр с добавлением и без 0,5 %  $H_2O_2$ . Рассматриваются следующие анодно-катодные пары: Fe/Fe, Ti/Ti, Cu/Cu, Cu/Fe, Fe/Cu, Ti/Fe, Fe/Ti, Cu/Ti и Ti/Cu. Наименьшая эрозия катода в отсутствие  $H_2O_2$  наблюдалась для меди. Наименьшая эрозия анода при тех же условиях наблюдалась для титана, в то время как для меди она была наибольшей. Добавление  $H_2O_2$  приводило к тому, что наименьшая эрозия катода была для титана, а наибольшая для железа. Наибольшую эрозию анода показывала по-прежнему медь. Экспериментально была найдена корреляция для степени эрозии для различных пар катод – анод и данные были аппроксимированы кривой.

#### Микроразряд

Для исследования механизмов взаимодействия генерируемых плазмой разряда активных частиц с целевыми объектами и очистки воды с низкой концентрацией загрязняющих веществ зачастую используется анодный микроразряд, представляющий собой квазистационарный тлеющий или коронный разряд в парогазовом промежутке между металлическим анодом и жидким (погруженным в воду) электролитным катодом. В работе [21] предложен метод деструкции растворенных в воде органических соединений под воздействием активных частиц, образующихся в водной среде при возбуждении в ней короткоживущих анодных микроразрядов, возникающих на погруженных анодах из вентильных металлов (Al, Ta, Nb, Zr и т. д.) при повышенных напряжениях. Авторы назвали этот безреагентный метод «электрорадиационным», поскольку в работе показано, что анодные микроразряды в режиме «максимальных напряжений» действуют на водную среду подобно радиолизу. Метод обладает преимуществами классического радиолиза, но не имеет его недостатков.

Эксперименты по деструкции органических примесей электрорадиационным методом проведены с насыщенными растворами таких трудноразрушаемых соединений, как бензол, фенол, хлороформ и дихлорэтан. Особенность рассматриваемого процесса обусловлена обратной связью характеристик разряда с параметрами раствора, а также локализацией первичной реакционной зоны в узком при разрядном слое раствора в области высокого градиента электрического потенциала. При вариации ионной концентрации

(электропроводности) электролита выходы рекомбинации и захвата ОН проходят через максимум. Это связано с конкурентными процессами ионизации воды и аниона при высоких электропроводностях, а также с уменьшением плотности тока на катодном пятне при низких электропроводностях. Существенное влияние на параметры процесса оказывает рН среды: его изменение модулирует диссоциацию и электромиграцию в приразрядную зону как дикарбоновых кислот, так и фенола в форме фенолят-иона. Поэтому при высоких степенях превращения кислотность среды увеличивает деструкцию фенола, а при малых – снижает. Продемонстрировано, что эффективность электрорадиолиза для разбавленных растворов фенола сравнима, либо превышает эффективность классического радиолиза.

Важной чертой процесса является то, что его эффективность растет (а удельные энергозатраты падают) с уменьшением исходных концентраций органического компонента. Таким образом, метод удобно использовать для глубокой очистки воды.

В работе [22] исследован механизм разрушения углеводов в водной эмульсии под действием анодных микроразрядов, возникающих при наложении относительно небольшого электрического напряжения (до 700 В) на поверхности вентильных металлов, погруженных в раствор электролита. Представлены данные о процессах, происходящих под действием микроразрядов на алюминии в водных эмульсиях углеводов и их производных с большим молекулярным весом и плохо растворимых в воде (ряда алканов) в карбонатном электролите. Изучались растворы пентадекана, тридекана, декана, октана и стирола (алканы). Под воздействием микроразряда происходило разрушение углеводорода, образование газов и появление твердого полимера. Основной механизм разрушения углеводов по мнению авторов – возникновение в парогазовом пузырьке (ПГП) микроразряда радикалов гидроксила, гидратированных электронов и атомарного водорода, выход этих радикалов из зоны разряда в прилегающий к ПГП слой жидкости и взаимодействие в этом слое с акцепторами. В работе показано, что метод может быть использован для очистки водных растворов от этих соединений, в том числе от относящегося ко второму классу опасности стирола. Выход разрушения стирола достигает 8 молекул на 100 эВ в 0,04 М растворе стирола (4,51 кДж/г).

Параметры реализации различных электрических разрядов, обеспечивающие наилучшие условия для разложения примесей в воде генерируемыми разрядом химически активными частицами, исследованы в работе [23]. Рассмотрены импульсные и стационарные разряды в системах с жидким анодом или катодом. Исследовалось как влияние электротехнических параметров разрядной цепи, так и геометрических, совокупность которых определяла характер развития разряда. Влияние характеристик разряда на особенности протекания реакции в жидкости изучалось для процесса полного обесцвечивания водного раствора перманганата калия. В этих опытах установлено, что толщина слоя воды над электродом не должна превы-

шать 20 мм, газовая полость над поверхностью жидкости должна иметь минимальную высоту, существует оптимальное значение напряженности электрического поля и при повышении или уменьшении напряженности поля эффективность реакции падает, наиболее эффективно очищает раствор от ионов магния импульсный искровой разряд. В реакции разложения цианистого калия наиболее эффективным оказался импульсный коронный разряд («отрицательная корона»), т.е. для осуществления конкретных реакций существуют оптимальные условия электрического разряда.

### Разряды над поверхностью воды

Новым подходом к проблеме очистки воды от различных загрязнителей стало инициирование реакций в жидкости с использованием активных частиц, образующихся в газовой фазе в плазме электрического разряда при высокой напряженности электрического поля. В работе [24] исследовано влияние частоты разряда над поверхностью воды в разряженной атмосфере на очистку воды от органических загрязнителей с помощью радикалов ОН. Использовался анод в форме диска и погруженный («жидкий») сетчатый катод. На поверхности насыщенного водяного пара формировались тлеющие разряды на постоянном токе (DC), низкой частоте (LF 100 кГц) и радиочастоте (RF 13,56 МГц). Эффективность очистки воды оценивалась по обесцвечиванию раствора N, N-диметил-п-нитроанилина и измерениям концентрации радикала ОН в разрядном промежутке. Наибольшая концентрация ОН зафиксирована вблизи водной поверхности. Показано, что наиболее эффективным является радиочастотный тлеющий разряд RF. В сравнении с другими видами разряда, RF разряд является более стабильным, требует меньшее приложенное напряжение, охватывает всю область между электродом и поверхностью воды. Эффективность очистки, по мнению авторов, будет выше при перемешивании растворов.

В работе [25] исследована химическая эффективность импульсного коронного разряда атмосферного давления в промежутке «многоигольчатый анод - плоский жидкий катод» в процессе очистки воды от органических примесей, в частности, фенола и гептана. Экспериментально определены времена, необходимые для разложения 99 % фенола (540 с) и полного разложения гептана – 360 с. Измерение энергетического выхода по фенолу в процессе обработки подтвердило общую закономерность: чем ниже концентрация примеси в водном растворе, тем ниже энергетический выход при ее разложении разрядом. Средние энергетические выходы при почти полной очистке растворов от фенола и гептана в условиях описываемых исследований составили соответственно 4,5 г/(кВт·ч) и 3,2 г/(кВт·ч). Показано также, что использование вместо постоянного напряжения импульсного позволило увеличить энергетический выход по фенолу до 20 г/(кВт·ч), что в 1,5-2 раза выше, чем в известных электроразрядных технологиях и на 10-20 % лучше, чем при прямом озонировании.

Близким по конструкции к использовавшемуся в

работе [25] разрядному реактору является устройство для обеззараживания воды (очистки воды от биологических загрязнителей) с помощью импульсного коронного разряда, предложенное в [26]. Отличия состоят во введении нового оборудования для озонного барботирования, что позволяет, по мнению авторов, осуществлять дополнительное обеззараживание и за счет этого повысить эффективность обеззараживания воды и снизить энергозатраты.

В работе [27] изложены результаты очистки сточной воды от различных красителей коронным разрядом. Корона формируется над тонким слоем воды. Дно плексигласового реактора представляет собой диэлектрический барьер, имеющий две функции: он удерживает текущий импульс коротким и предотвращает попадание ионов металла катода в воду. Максимальная амплитуда импульсов емкостного генератора (TLT) достигала 40 кВ, частота повторения импульсов – 10 импульсов за секунду. Энергия в импульсе составляла 60 мДж, средняя рассеиваемая мощность в реакторе 0,6 Вт. В качестве красителей в экспериментах использовался метиловый голубой (как основной) и метилоранж.

В работе контролировалась концентрация красителя, и измерялся выход г/(кВт·ч). Приведено сравнение результатов, полученных авторами, с результатами очистки другими методами - совместного воздействия перекиси водорода и катализа, влияния фентон-подобных реакций, комбинированным эффектом фотодегradации и перекиси водорода, эффектом сонолюминесценции и влиянием на удаление красителя импульсной короной, генерируемой в водной фазе.

Очистка короной в воздухе достигается за 15–20 мин, что подтверждается другими источниками, однако предложенный метод является более энергоэффективным – полученный выход составляет 4,6 г/(кВт·ч) при начальной концентрации 10 мг<sup>-1</sup> и конверсии 90% по сравнению с другими. Причина кроется в том, что в предложенном реакторе существенно ниже тепловые потери энергии разряда - рост температуры в процессе обработки составляет не более ~ 1К после полного обесцвечивания.

В статье [28] представлены результаты исследования очистки речной воды от биологических загрязнителей положительной стримерной короной. С этой целью авторами был разработан и создан высокочастотный высоковольтный генератор стримерных разрядов с длительностью импульса менее 10 мкс, фронтом нарастания импульса в десятки наносекунд, частотой следования импульсов 10 кГц. Рабочее напряжение на анодах – остриях порядка 50 - 60 кВ. Конструкция реактора для электроразрядной очистки мало отличается от представленных в [25] и [26]. Вода обрабатывалась в стационарном и проточном режимах. В первом случае за время обработки в течении 30 с Coli-индекс снижался в 17 раз, микробное число – в 7 раз. В проточном режиме при организации скорости потока в 0,3 л/мин эти показатели уменьшались до величин ниже пределов измерения.

Определенный интерес представляют также не-

которые исследования электроразрядной очистки газов. Во-первых, потому, что на практике иногда используются реакторы, в которых плазма не находится в непосредственном контакте с жидкостью, и предложенные решения могут непосредственно использоваться в водоочистке, а во-вторых, полученные результаты и идеи могут быть полезны для разработки новых реакторов для очистки воды.

Работа [29] посвящена вопросам очистки воздуха в плазме коронного разряда различной полярности и частоты от летучих органических соединений (ЛОС). И «чистый» воздух, и загрязнители были представлены модельными смесями. В качестве моделей ЛОС использовались два алкана (н-гексан и i-октан), один ароматический углеводород (толуол) и два галогенированных метана, дибромметан и дибромдифторметан. Работа интересна тем, что в ней показано, как загрязнители могут влиять на состав плазмы разряда. В процессе обработки различных ЛОС в плазме коронного разряда могут возникать очень эффективные каталитические циклы, способствующие разрушению активных радикалов, в частности, озона. Изучение реакций и механизмов ЛОС-окисления, вызванных короной в воздухе при атмосферном давлении, показывает большое разнообразие химического поведения в зависимости от типа ЛОС, режима короны и других условий эксперимента, в частности наличия и степени влажности воздуха.

В работе [30] исследованы вопросы эффективности использования стримерной импульсной короны, формирующейся в коаксиальном проволочно-цилиндрическом реакторе субнаносекундным источником высоковольтных импульсов (импульсы 2-9 нс с временем нарастания 0,4 нс) для генерации озона и удаления оксида азота NO. Максимальный получаемый выход озона составлял около 175 г/(кВт·ч) в синтетическом воздухе, – высокий по сравнению с другими импульсными плазмами. Показано также, что оксид азотоможно очень эффективно удалять из синтетического воздуха с выходами до 2,5 моль/(кВт·ч) для начальной концентрации NO<sub>135</sub> частей на миллион при удалении 50%. Для высоких концентраций вплоть до 225 миллионных долей – на уровне 1,75 моль/(кВт·ч) (или 21,3 эВ на молекулу NO) при удалении 50%. Однако для еще более высоких концентраций энергоэффективность значительно уменьшается. Из анализа всех побочных продуктов, образующихся в плазме разряда, можно сделать вывод, что при высоких значениях, концентрация NO будет находиться в равновесии с концентрацией NO<sub>2</sub>, ингибируя дальнейшее удаление NO. Время нарастания импульсов оказывает гораздо более значительное влияние на генерацию озона и удаление NO, чем длительность импульса. В зависимости от того, какой побочный продукт является предпочтительным, могут использоваться отрицательные импульсы (тогда больше озона и N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) или положительные импульсы (больше N<sub>2</sub>O и NO<sub>2</sub>).

### Водо-воздушные смеси

Проблема эффективного использования энергии

электрического разряда для очистки воды тесно связана с площадью контакта плазмы разряда с водой. Для увеличения площади контакта используют разные способы: перемешивание жидкости, создание проточных реакторов, разряд в гетерогенных средах, организация разряда, скользящего вдоль поверхности жидкости, разряд в водо-воздушных смесях, разряд в пузырьках газа, и сочетание различных методов. Метод получения OH и O радикалов в плазменной струе скользящего дугового разряда атмосферного давления в смеси воздуха, аргона и паров воды предложен в [31]. Разряд осуществлялся в газовой-капельной смеси, подаваемой распылителем по стеклянной трубке между двумя плоскими медными электродами. Два типа газовых композиций: воздух/H<sub>2</sub>O и воздух/Ar/H<sub>2</sub>O, использовались для исследования вероятных механизмов образования и разрушения OH и O-радикалов и влияния на эти процессы добавления аргона. На электроды подавалось переменное напряжение прямоугольной формы с частотой 250 Гц. Напряжение и ток разряда осциллографировались. Исследовано влияние скорости потока смеси на плазму. Количество энергии, поглощаемой плазмой, равно примерно 5-8 Вт. Расход газа не играет значительной роли для изменения рассеиваемой мощности в плазму для низкочастотного источника питания (250 Гц).

Спектры излучения плазмы разряда использовались для исследования кинетики компонентов, температуры газа, плотности возбужденного состояния молекул и электронов  $n_e$ . Установлено, что производство радикалов OH и O увеличиваются с увеличением концентрации аргона в газовой смеси, приложенного напряжения и  $n_e$ . По мнению авторов, предложенный метод эффективней, чем «стандартные» методы получения радикалов с помощью нетермической плазмы.

В работе [32] приведены результаты исследования влияния различных факторов на характер прерывистого электрораспыления воды в сочетании с положительным коронным разрядом постоянного тока в воздухе. Применялись оптические методы исследования газо-жидкостной струи с помощью фотоумножителя и высокоскоростной камеры совместно с осциллографированием разрядного тока. Синхронизация измерений производилась с помощью генератора импульсов. Был визуализирован повторяющийся процесс образования конуса Тейлора и образования капель из массовых фрагментов воды во время электрораспыления. Результаты показывают обратный характер прерывистого электрораспыления воды и наличия коронного разряда, где и электрораспыление, и разряд влияют друг на друга. Генерация коронного разряда из водного конуса зависела от повторяющегося процесса формирования конуса. На распространение и кривизну водной нити влияли разряды и возникающий объемный заряд. Кроме того, эти явления частично зависели от проводимости воды. Такой метод сочетания электрораспыления и разряда является перспективным для очистки воды, поскольку увеличивает площадь взаимодействия плазмы с водной поверхностью.

Скользящий по поверхности жидкости импульс-

ный искровой разряд в проточном реакторе предложен для обеззараживания жидкостей в патенте [33]. Эффект достигается за счет нового конструктивного решения, благодаря которому по поверхности очищаемой жидкости может развиваться несколько линейных каналов разряда, в зависимости от количества и конструкции анодов. Метод может быть перспективным – все факторы разряда, влияющие на очистку жидкости, находятся в непосредственной близости от объекта обработки, а благодаря тому, что разряд не погружен в жидкость, отсутствуют «непродуктивные» потери энергии.

В [34] предложена система, где оба электрода находятся над поверхностью воды. В такой системе разряд может проходить как непосредственно между электродами, так и через водную поверхность. В представленной работе рассмотрены критерии перехода от стримерного разряда к дуговому. Параметры разрядного контура: напряжение до 70 кВ, длительность импульса 500-600 нс, частота следования импульсов от 10 до 200 импульсов в секунду. Найдены параметры разряда, при которых разряд идет главным образом через водную поверхность, что значительно увеличивает химическую эффективность очистки.

В [35] разряд над водой высокой электропроводности в проточном реакторе осуществлялся в электродной системе анод – плоскость (изготовлен из волокнистого углерода – Carbon-felt) и плоский жидкий катод (вода). Расстояние от анода до поверхности воды не превышало 10 мм. Такая система полностью решала проблему коррозии электродов и влияния металла на реакции в воде. При напряжении 7,6 кВ в промежутке зажегся стримерный разряд, при 22 кВ он переходил в дуговой. Длительность импульса составляла 500 нс. Обнаружено что замена металлического электрода погруженного в воду на саму воду соединенную проводом с землей практически не изменяет электрические характеристики, оптические эмиссионные спектры, эффективность производства радикалов и эффективность окисления сульфитов. Углеродное волокно является прекрасным материалом для электрода, обладающим хорошей электропроводностью, гибкостью и химической и тепловой стойкостью. Использование неметаллического электрода рекомендовано для очистки воды с удельной электропроводностью более 1 мСм/см.

### Гибридные реакторы

Как правило, одним методом очистить воду, даже с одним видом загрязнителя, чаще всего невозможно. Поэтому появляются так называемые гибридные реакторы, сочетающие в себе два или более метода очистки. Например, в работе [36] предложен новый энергоэффективный метод очистки стоков. Основная идея заключается в том, что при очистке воды от нитрофенола разрядом с параметрами: частота 50 Гц, напряжение 0 – 60 кВ, многоштырьковый анод и жидкий катод, расстояние до воды 2 мм, в воду добавляют пероксодисульфат, что существенно увеличивает производство радикалов, включая сульфатные радикалы.

Результаты эксперимента показывают, что небольшое увеличение проводимости в этом случае ведет к существенному уменьшению затрат энергии. Например, при увеличении приложенного напряжения с 16 кВ до 20 кВ дает прирост эффективности деградации п-нитрофенола 21,5 % до 32,3 %, а соответствующая энергетическая эффективность увеличилась с 11,9 мг/(кВт·ч) до 18,0 мг/(кВт·ч), соответственно. При степени очистки сточных вод 90,7% при 20 кВ энергоэффективность составляет 45,0 мг/(кВт·ч).

Другая идея – новый тип реактора, в котором одновременно реализуется коронный разряд над поверхностью жидкости и искровой – в объеме жидкости, предложена в работе [37]. Внешняя камера реактора из изолирующего материала служит для отвода и подвода газов и жидкости, внутренняя металлическая является разрядной камерой и одновременно катодом цилиндрической формы, разделенным перегородкой с отверстием. Верхняя часть разрядной камеры до перегородки покрыта изолирующим материалом. Уровень воды над перегородкой регулируется. Сверху над поверхностью раздела газ-жидкость, устанавливается высоковольтный электрод, выполненный из сетчатого стеклообразного углерода (RVC) – для реализации импульсной короны. Расстояние от электрода RVC до плоского катода – 40 мм. Снизу сквозь днище реактора через изолятор в жидкую фазу вводится высоковольтный точечный электрод. Каждый из электродов подключен к отдельному высоковольтному импульсному источнику питания. Параметры источников: регулируемое напряжение 0-50 кВ, емкость накопителя 0,2-2 нФ, частота следования импульсов – до 100 Гц.

Исследовалось влияние электрических характеристик разрядов и состава газовой смеси на уровень производства озона. Показано, что на эффективность системы влияет изменение входной мощности, и длительности высоковольтного импульса. Наилучший результат – 23 г/(кВт·ч) – получен при длительности импульса 150 нс.

Основным преимуществом такого реактора, по мнению авторов, является то, что в нем реализуются те же химические и физические эффекты, которые инициируются в отдельных газовых и жидкофазных разрядах.

Предложенная в [38] система для обеззараживания воды совмещает в себе пульсирующий барьерный диэлектрический разряд в жидкости с пузырьками газа и природные цеолиты модифицированные серебром. Система протестирована на бактерии *Escherichiacoli* в воде. Напряжение от 0 до 30 кВ, частота 100 – 2000 Гц, длительность импульса от 1 до 30 мкс, средняя энергия в импульсе до 117 мДж. В работе показано, что одновременное использование цеолита активированного серебром и барьерного диэлектрического разряда улучшает степень инактивации бактерий в полтора раза.

В последнее время увеличивается количество работ по исследованию разряда в пузырьках газа в жидкости. В [39] разработана модель химических реакций протекающих при электрическом разряде в маленьком

пузырьке кислорода в воде. В предложенной схеме газ подается снизу, через отверстие в стальном аноде и плоском керамическом днище сосуда с водой. Электропроводность раствора устанавливалась 100 мкСм/см путем добавления к ультрачистой воде сульфата натрия. Разрядный ток регулировался балластным сопротивлением и составлял 1, 3, 5 и 7 мА. На анод подавалось постоянное напряжение 1,2 кВ, при этом внутри пузырьков генерировалась нитевидная плазма.

Для определения концентрации численно решаются кинетические уравнения. Система включает в себя следующие уравнения: 3 для электронной диссоциации в газе, 37 химических реакций в плазме, 5 реакций для взаимодействия газ-жидкость, 3 для электролитической диссоциации в жидкости и 15 для химических реакций в жидкости. Данные расчетов сравниваются с экспериментом, найдено хорошее соответствие. Экспериментально концентрация радикалов определяется оптическим эмиссионным спектроскопом для газовой фазы и абсорбционным спектроскопом для жидкой фазы. В газе содержатся следующие вещества: O, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, OH, H, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, HO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. В жидкости содержится O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, OH, H<sub>2</sub>O, HO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup> и HO<sub>2</sub><sup>-</sup>.

Работа [40] посвящена разработке способа очистки воды небольшим реактивным плазменным насосом, приводимым в движение капиллярным разрядом в пузырьках. Используется капиллярный разряд, в котором пузырьки возникают вследствие разогрева током высокой плотности в капилляре между двумя сосудами с водой. Работа устройства основана на перепаде давления Лапласа при перемещении пузырьков между капиллярами разных размеров. Устройство разработано таким образом, что и транспортировка и очистка воды могут быть достигнуты без необходимости использования внешней системы подачи газа и насоса.

Экспериментально определено, что частота генерации пузырьков наибольшая при потребляемой мощности 17,8 Вт, она является оптимальной операционной мощностью для максимизации скорости транспортировки жидкости. Химическая эффективность устройства была подтверждена с использованием эмиссионной спектроскопии OH радикалов при разложении голубого метилена (methylene blue).

В [41] исследуется влияние плазмы электрического разряда при атмосферном давлении на водный раствор нитратов. Частота разряда 27 кГц, напряжение до 15 кВ, конфигурация электродов острие-острие (pin-to-pin), при этом катодом является сопло для подачи газа, погруженном в воду. Разряд осуществлялся в воздухе, аргоне и смеси аргона с метаном. В качестве нитратного реагента использовалась соль на основе KNO<sub>3</sub>. Использовались УК – спектроскопия и ионная хроматография для анализа эффекта влияния разряда на концентрацию загрязнителя. Оптическая эмиссионная спектроскопия использовалась для определения активных веществ возникающих в воде и на ее поверхности. Наблюдалось образование следующих радикалов OH, H<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. При разряде в воздухе об-

наружено образование значительных количеств азотной кислоты, что усложняет очистку воды. pH раствора снижается от 5,3 до 2,2 после 15 - минутной плазменной обработки. При обработке раствора плазмой, генерированной в Ag и Ag/CH<sub>4</sub>, увеличивается с 5,3 до 6,5.

Большую энергоэффективность показывает барьерный тип разряда (DBD), возникающий в газе под действием приложенного к электродам напряжения, при этом хотя бы один из электродов должен быть изолирован диэлектрическим материалом. Такой разряд является эффективным способом генерации озона и гидроксил-радикалов в воздухе, содержащем пары воды.

В работе [42] представлены результаты экспериментальных исследований электрических, оптических и спектральных характеристик импульсного диэлектрического барьерного разряда (DBD) в водо-воздушной смеси. Полидисперсный водо-воздушный поток с диаметром капель 1 – 2 мм при прохождении сквозь систему цилиндрических электродов, изолированных друг от друга при помощи диэлектрических барьеров, обрабатывался импульсными разрядами с амплитудой напряжения 15 – 30 кВ, частотой следования импульсов 1000 с<sup>-1</sup>, длительностью фронта напряжения на выходе генератора 150 нс и общей длительностью импульса от 400 до 800 нс. В работе показано, что напряжение зажигания разряда в водо-воздушной среде составляло 14 – 16 кВ, что существенно ниже значения этого параметра в воздухе (25 кВ). Активное энерговыделение в разрядном промежутке зависит от объемной скорости потока воды: при ее увеличении с 0,0 до 0,36 м<sup>3</sup>/ч оно возрастает с 42 до 60 мДж/импульс. Исследования эмиссионных спектров разряда показали, что разряд в водо-воздушной среде является источником гидроксильных радикалов (OH). В работе показано, что разряд в водо-воздушной среде зажигается преимущественно вблизи поверхности раздела фаз вода-воздух, что способствует созданию условий перевода значительной части радикалов из газовой фазы в обрабатываемую воду и делает электроразрядную обработку перспективным направлением.

Поскольку плазма DBD генерируется тонким слоем вдоль поверхности диэлектрика, недостатком DBD для очистки воды является то, что она не достигает очищаемой воды. Это приводит к резкому уменьшению концентрации реакционно способных радикалов с коротким временем жизни с высокими окислительными потенциалами, такими как радикалы OH и O, в воде. Возникает потребность в нахождении новых инженерных решений, позволяющих преодолеть эту проблему. В работе [43] исследовано влияние пористого керамического сегмента, помещенного в зону между электродами, на эффективность очистки и обеззараживания воды от органических загрязнений диэлектрическим барьерным разрядом. Этот пористый сегмент, помещенный на металлический электрод, служил в качестве направляющей для проточной воды. Благодаря гидрофильной поверхности этой вставки с высокой поверхностной энергией, поток воды,

обычно возмущенный электрическим разрядом, гомогенизировался, что позволило уменьшить разрядный промежуток, а также увеличить интенсивность, стабильность и однородность разряда. Эксперименты подтвердили, что использование такой модернизированной конструкции электродной системы позволяет повысить эффективность очистки и обеззараживания воды диэлектрическим барьерным разрядом примерно на 35 %.

Новый подход, основанный на DBD в газах атмосферного давления (кислород, воздух) к получению озона и других плазмохимических продуктов для очистки воды (водоподготовки) предложен в [44]. В работе предложен новый тип реактора, в котором разряд реализуется в специальном способе изготовленных в нанопористом оксиде алюминия ( $Al_2O_3$ ) микроканалах, имеющих трапециевидный или параболический профиль поперечного сечения и размеры, сопоставимые с размерами стримерного плазменного канала, что позволяет существенно снизить напряжения зажигания разряда. Для 12-ти канального устройства исследовано влияние материала, из которого изготовлен реактор (стекло,  $Al/Al_2O_3$  и гибридных), на энергоэффективность разряда, напряжение его зажигания и зависимость скорости производства озона от общего тока. Показано, что наилучшие показатели достигаются для системы  $Al/Al_2O_3$ , гибридные реакторы занимают промежуточное положение. Установлена возможность масштабирования этой технологии микроканальной плазмы, по меньшей мере, до 24 каналов, которые представляют общий объем реактора ~ 170 мкл. По мнению авторов, с этой технологией могут быть реализованы конкурентоспособные мощности и концентрации генерации  $O_3$  ( $> 85$  г/(кВт·ч) и  $17$  г/м<sup>3</sup> соответственно), выход  $O_3 \sim 4$  г на мл объема реакции (плазмы). При этом предложенные реакторы предлагают значительно уменьшенный вес и объем (при заданной производительности) по сравнению с обычной DBD технологией. Предварительные ресурсные испытания показали срок службы реакторов более 1500 часов непрерывной работы.

В работе [45] рассматривается использование барьерного диэлектрического разряда как способа разрушения анилина содержащегося в воде, который в свою очередь является одним из опаснейших загрязнителей воды. Рассматривалась как форма электрического импульса, так и оптические эмиссионные спектры при разряде. Исследовались различные характеристики, влияющие на эффективность: расстояние очистки, энергия разряда, время разряда, начальный уровень pH, добавление дополнительно карбоната натрия и перекиси водорода. Найдено что уровень очистки возрастает с увеличением энергии разряда. При прочих равных условиях наибольшего эффекта удалось добиться для расстояния очистки равного 0. При энергии в импульсе 21,5 Вт более 84 % анилина было разрушено при обработке воды в течении 10 мин. Добавление перекиси водорода и карбоната натрия увеличивает скорость разрушения анилина. Предложены возможные механизмы реакций при разрушении анилина при барьерном диэлектрическом

разряде, подтвержденные наблюдением эмиссионных спектров. Наибольшее напряжение 23 кВ, частота до 17 кГц.

Экспериментальным исследованиям влияния частоты подаваемого напряжения синусоидальной формы на характеристики реактора на основе поверхностного диэлектрического барьерного разряда для оценки эффективности реактора DBD в производстве озона посвящена работа [46]. Частота варьировалась от 1 до 10 кГц при напряжениях до 6 кВ. В работе показано, что плотность энергии растет с частотой линейно. Концентрация озона линейно возрастает с плотностью энергии независимо от частоты. Результаты также указывают на то, что энергия потребляется в DBD более эффективно для производства озона, когда он работает на низких частотах, где энергетический выход линейно увеличивается с плотностью энергии до 10 Дж/л. Более того, частота оказывает незначительное отрицательное влияние на концентрацию озона при высоких плотностях энергии. Наибольший энергетический выход, достигаемый в реакторе DBD, составляет приблизительно 52 г/кВт·ч при плотности энергии 10 Дж/л. Увеличение плотности энергии выше 10 Дж/л приводит к резкому снижению энергетического выхода озона независимо от частоты.

В работе [47] приведены оценки экономической эффективности применения электроразрядной очистки бытовых сточных вод с использованием прототипа оборудования, предложенного автором. Разрядный реактор цилиндрической формы использует для очистки диэлектрический барьерный разряд как наиболее перспективный для очистки в промышленных масштабах. Всего для замены традиционной очистной системы по расчетам автора требуется 28 реакторных матриц производительностью 10 л/мин. При этом экономия средств составляет около 20 %.

Влияние атмосферной плазмы, возникающей при барьерном диэлектрическом разряде, на улучшение качества воды, изучается в работе [48]. Параметры: частота 5,5 кГц, напряжение 3,5 кВ, газ качается со скоростью 15 литров в минуту. Исследовались дистиллированная вода, обычная поверхностная вода и домашние стоки. В работе показано, что в процессе обработки значительно снижается общая минерализация воды. Вероятно, это связано с падением уровня pH до 2 (для дистиллированной воды после 60 минут обработки, для стоков и поверхностной воды требуется 120 минут) за счет возникновения в плазме радикалов  $HNO_3$ ,  $HNO_2$ ,  $O_2$  и  $O_3$ . Показатель ХПК снижался на 40% после обработки в течении 2 часов.

Новый крупномасштабный источник плазмы, который может генерировать два режима разряда – поверхностный диэлектрический барьерный разряд и плазменную струйную решетку предлагается в статье [49]. Переключение между двумя режимами разряда может быть легко реализовано путем изменения скорости потока гелия. Обнаружено, что плотность некоторых видов излучаемых частиц, таких как OH, увеличивается с увеличением скорости потока гелия, но плотность других видов частиц, таких как  $O_3$ , умень-

шается из-за соударений с газом, в то время как в воде их концентрация увеличивается. Мощность разряда при увеличении потока гелия изменяется незначительно, но плотность водных реактивных частиц, индуцированных плазмой, изменяется сильно. Источник плазмы обладает хорошей адаптивной способностью для различных требований к применению. Однако возможности применения источника в промышленных масштабах может оказаться под вопросом ввиду использования дорогостоящего гелия.

В работе [50] экспериментально и теоретически исследованы возможность и особенности химической активации жидкой среды (воды) плазмой диэлектрического барьерного разряда атмосферного давления. В экспериментальном реакторе использована схема с жидким анодом. Проведено сравнение формы подаваемого на электроды напряжения – синусоидального и импульсно-периодического наносекундного, и времени обработки, на процесс химической активации воды. Оптическая визуализация процесса взаимодействия плазмы разрядов с жидкостью показала, что плазма импульсного разряда является почти однородной, в то время как при синусоидальном разряде формируется порядка четырех интенсивных стримеров. Для наносекундного разряда характерен длительный переходный процесс, свидетельствующий о несогласованном характере разряда. В то же время, при использовании наносекундного разряда образуется большее количество озона и пероксида водорода, чем при синусоидальной форме импульса.

В кратком обзоре невозможно учесть все особенности реализации электроразрядных методов очистки воды. В частности, нами здесь не затрагивались вопросы образования плазмы разряда, хотя, как отмечается в работе [51], механизмы формирования и развития лидерной (стримерной) системы существенно зависят от параметров жидкой среды, в том числе процессы тепловой диссоциации воды и образование ионов  $H^+$  и  $OH^-$ . Более или менее полный обзор процессов образования нетермической плазмы разряда, наиболее часто используемой в последнее время для процессов электроразрядной очистки воды (это следует и из нашего обзора), опубликован в [52]. Рассмотрен разряд в различных системах: в жидкости, в контакте с жидкостью, в пузырьковых средах, а также при различных конфигурациях электродных систем, схемах подачи жидкости или газа.

### Выводы

В реакторах электрогидравлического разряда, а также в гетерогенных средах, где плазма производится непосредственно в жидкости, материал электродов или металлозагрузки имеет значительное влияние на разложение органических соединений и окисление других примесей из-за контакта плазмы с поверхностью электродов и формирования эродирующих частиц в воде. Такие реакторы могут быть оптимизированы путем смещения одного из электродов в газовую среду и преобразования реактора к гибриднему типу, где плазма формируется в газовой среде, а также в жидкостной среде.

Вид разряда в одной и той же системе может зависеть как от электротехнических параметров разрядной цепи, так и геометрических, совокупность которых определяет характер развития разряда, что в свою очередь, влияет на особенности протекания реакций в жидкости.

Эффективность очистки воды от различных загрязнителей может зависеть от целого ряда факторов: вида разряда, полярности электродов, параметров приложенного напряжения, электропроводности и уровня pH жидкости, толщины слоя воды, скорости ее протока или перемешивания, высоты электрода над поверхностью и т.п. Например, импульс положительной полярности будет иметь высокую эффективность в электрогидравлическом или пузырьковом реакторе, в то же время импульс отрицательной полярности дает лучшую производительность в разрядных реакторах с газовой средой. Электрический разряд в газовой среде является более эффективным для разложения органики, чем разряд в жидкости.

Фактически, для каждого практического применения плазмы разряда необходимо разрабатывать и приспособлять специальные плазменные источники для того, чтобы получить оптимальные плазменные свойства. Определение связи между плазменными свойствами и наблюдаемыми эффектами является существенным для дальнейшей оптимизации метода.

Акцент исследований постепенно смещается в сторону применения разряда в водо-воздушной среде. При этом все чаще применяется неравновесная плазма, часто называемая нетермической плазмой, имеющая дополнительное преимущество, поскольку обеспечивает высокую энергетическую эффективность из-за отсутствия затрат энергии на Джоулев нагрев.

Наряду с атмосферным воздухом в ряде реакторов применялись другие газы. Кислород является наиболее предпочтительным газом для питания плазмы, так как он в основном увеличивает энергетическую эффективность по сравнению с другими газами включая воздух и аргон. Но применение других газов, да еще и при давлениях, отличающихся от атмосферного, может усложнить конструкцию реактора и увеличить удельную стоимость очистки.

Анионы  $NO_3^-$  и  $NO_2^-$ , которые возникают при разряде в воздухе, играют важную роль в подкислении воды, что важно для биологических применений. С другой стороны, эти побочные продукты оксида азота оказывают неблагоприятное влияние на процесс обработки газа из-за их реакций с загрязняющими веществами и промежуточными побочными продуктами, что приводит к получению более токсичных соединений. Следовательно, прежде чем использовать DBD в любом приложении, следует охарактеризовать тенденции производства озона и образования оксидов азота.

Таким образом, очистка воды – это технология, которая широко изучалась для многих видов нетепловой плазмы, таких как диэлектрические барьерные разряды (DBD), плазменная коронная струя, плавающие скользящие дуги и т. п. Фактически, исследования слишком многочисленны, чтобы перечислить их в этой работе. Это показывает, что тема активно иссле-

дуются, но также и то, что для всех приложений не найдено окончательного решения или оптимальной технологии. Одна из основных причин заключается в том, что не каждое приложение для очистки воды приносит одно и то же состояние плазмы.

Оптимизация плазменных реакторов для очистки воды с точки зрения затрат энергии и токсичности сточных вод – сложная задача, которая требует еще больших исследовательских усилий и понимания. С положительной стороны, обработка воды на основе плазмы уже показала себя как универсальная технология, которая может найти применение при очистке биологического, органического и неорганического загрязнения после достаточной оптимизации. В качестве дополнительного преимущества его гибкая конструкция позволяет легко сочетаться с другими современными методами обработки. Такие комбинации могут привести к интересным синергетическим эффектам и дальнейшей оптимизации.

В настоящее время можно с уверенностью утверждать, что к промышленному применению практически готовы методы очистки природных вод с невысокими концентрациями загрязнителей с помощью объемного барьерного разряда в воздушно-капельных смесях. Их можно применять для водоподготовки в регионах, где вода еще не слишком загрязнена. Неплохо проявляют себя методы очистки сточных вод гальванических производств при разряде в гетерогенных средах, даже при очень высоких концентрациях ионов тяжелых металлов в жидкости. Однако они также еще требуют доработки с точки зрения оптимизации энергозатрат при проточных режимах обработки воды в промышленных объемах и масштабирования метода.

#### Список литературы:

1. Кульский Л.А. Теоретические основы и технология кондиционирования воды / Л.А. Кульский. – К.: Наук. думка, 1971. – 506 с.
2. Гребенюк В.Д. Состояние и перспективы развития методов очистки сточных вод гальванических производств / В.Д. Гребенюк, Т.Т. Соболевская, А.Г. Махно // Химия и технология воды. – 1989. – Т. 11, № 5. – С. 407-421.
3. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л.А. Юткин. – СПб: «Машиностроение», 1986. – 252 с.
4. Зыкина Л.Н. Обеззараживание речной воды высоковольтными разрядами / Л.Н. Зыкина, В.С. Голдаев // Электронная обработка материалов. – 1974. – № 2. – С. 67-68.
5. Рязанов Н.Д. Действие обеззараживающих факторов импульсного электрического разряда в воде / Н.Д. Рязанов, Е.Н. Перевазкина // Электронная обработка материалов. – 1984. – № 2. – С. 43-45.
6. Богуславский Л.З., Жук И.А., Кривицкий Е.В., Скорых В.В. Пат. 1820697, Россия. Устройство для обработки воды электрическими разрядами. 1993.
7. Богуславский Л.З. Плазменные фильтры для обеззараживания сточных вод / Л.З. Богуславский, Е.В. Кривицкий, В.Н. Петриченко // Электронная обработка материалов. – 1995. – № 2. – С. 22-26.
8. Петриченко С.В. Протяженный коронный разряд в сильных водных электролитах / С.В. Петриченко // Электронная обработка материалов. – 2005. – № 2. – С. 58-63.
9. Petrichenko S.V. Control of the discharge plasma effective volume at the contact electrospark process in liquid / S.V. Petrichenko // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2008. – Vol. 44, iss. 3. – P. 169-174.
10. Левченко В.Ф. Опытнo-промышленный реактор очистки воды по электроимпульсной технологии / В.Ф. Левченко, В.П. Сергеевков, М.Г. Тютюник // Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности. – Николаев, 1988. – Ч. 2. – 227 с.
11. Левченко В.Ф. Электроимпульсный метод комплексной переработки материалов / В.Ф. Левченко // Проблемы машиностроения. – 1992. – Вып. 38. – С. 78-86.
12. Ющишина А.Н. Седиментационные характеристики электроразрядных гидроксидов алюминия и железа / А.Н. Ющишина, А.А. Зубенко, Л.А. Петриченко, А.П. Малюшевская, А.А. Смалько, С.А. Хайнацкий // Электронная обработка материалов. – 2005. – № 3. – С. 46-50.
13. Хайнацкий С.А. Экспериментальное исследование некоторых закономерностей эрозии алюминиевых и железных гранул при высоковольтных электрических разрядах в реакторе с металлической загрузкой / С.А. Хайнацкий, А.А. Зубенко, А.А. Смалько // Электронная обработка материалов. – 2005. – № 4. – С. 62-65.
14. Khainatskii S.A. Removal of heavy-metal ions from water by means of high-voltage discharges in reactors with a granulated metal charge. II. Industrial galvanic wastewater / S.A. Khainatskii, A.A. Zubenko, L.A. Petrichenko, A.A. Smal'ko, V.A. Kreshchenko, N.E. Ponomarenko, T.V. Tyurina // Surface Engineering And Applied Electrochemistry. – 2005. – No. 6. – P. 44-49.
15. Khainatskii S.A. Removal of heavy-metal ions from water by means of high-voltage discharges in reactors with a granulated metal charge. I. Model solutions / S.A. Khainatskii, A.A. Zubenko, L.A. Petrichenko, A.A. Smal'ko, V.A. Kreshchenko, V.L. Kovalenko // Surface Engineering And Applied Electrochemistry. – 2005. – No. 6. – P. 50-55.
16. Даниленко Н.Б. Химические реакции при действии импульсных электрических разрядов на активную металлическую загрузку в растворе солей хрома (VI) / Н.Б. Даниленко, Г.Г. Савельев, Н.А. Яворовский, Т.А. Юрмазова // Журнал Прикладной Химии. – 2007. – Т. 80, № 1. – С. 88-94.
17. Lobanova G.L. Investigation of the mechanism of microplasma impact on iron and aluminum load using solutions of organic substances / G.L. Lobanova, T.A. Yurmazova, L.N. Shiyan, D.A. Voyno // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81. – URI: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/81/1/012076/meta>.
18. Lobanova G.L. Electropulse treatment of water solution of humic substances in a layer iron granules in process of water treatment / G.L. Lobanova, T.A. Yurmazova, L.N. Shiyan, K.I. Machekhina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 110. – URI: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/110/1/012098/pdf>.
19. Lobanova G.L. Destruction of humic substances by pulsed electrical discharge / G.L. Lobanova, T.A. Yurmazova, L.N. Shiyan, K.I. Machekhina, M.A. Davidenko // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 168. – URI: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/168/1/012012>.
20. Parkansky N. Electrode erosion during submerged arc treatment of methylene blue water solution / N. Parkansky, V. Yakubov, I.I. Beilis, R.L. Boxma, O. Berkh // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2015. – Vol. 48, No. 22. – URI: <http://10.1088/0022-3727/48/22/225202>.
21. Бадалян А.М. Высокоэффективный метод уничтожения органических загрязнений в воде / А.М. Бадалян, О.В. Поляков, А.М. Сорокин, Е.К. Подгорная // Письма в ЖТФ. – 1996. – Т. 22, № 15. – С. 20.



22. Бугаенко Л.Т. Механизм разрушения углеводов в водной эмульсии под действием анодных микроразрядов / Л.Т. Бугаенко, Т.А. Калинина, Г.В. Ковалев, А.М. Сизиков // Химия высоких энергий. – 2004. – Т. 38, № 2. – С. 143-150.
23. Пискарев И.М. Выбор условий электрического разряда при генерировании химически активных частиц для разложения примесей в воде / И.М. Пискарев // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69, вып. 1. – С. 58-65.
24. Sugama Chie Glow Discharge Formation over Water Surface at Saturated Water Vapor Pressure and Its Application to Wastewater Treatment / Sugama Chie, Tochikubo Fumiyoshi, Uchida Satoshi // Japanese Journal of Applied Physics. – 2006. – Vol. 45, No. 11. – P. 8858-8863.
25. Белинский В.В. Импульсный коронный разряд на поверхность электропроводящей жидкости и его использование для обработки воды / В.В. Белинский, И.В. Божко, Д.В. Чарный // Техническая электродинамика. – 2010. – № 3. – С. 21-27.
26. Богуславський Л.З., Казарян Ю.Г., Струк Я.П., Куніженков В.В., Ярошинський М.С. Пат. 99276, Україна. Установка для знезараження води. 2015.
27. Grabowski L.R. Breakdown of methyleneblue and methylorange by pulsed corona discharge / L.R. Grabowski, E.M. van Veldhuizen, A.J.M. Pemenand, W.R. Rutgers // Plasma Sources Science and Technology. – 2007. – Vol. 16, No. 2. – URI: <http://10.1088/0963-0252/16/2/003>.
28. Богуславський Л.З. Установка для обеззараживання води високочастотним стримерним разрядом / Л.З. Богуславський, Н.С. Ярошинський // Збірник наукових праць національного університету кораблебудування. – Миколаїв: НУК, 2015. – № 5. – С. 88-93.
29. Marotta E. Products and mechanisms of the oxidation of organic compounds in atmospheric air plasmas / E. Marotta, M. Schiorlin, M. Rea, C. Paradisi // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2010. – Vol. 43, No. 12. – URI: <http://10.1088/0022-3727/43/12/124011>.
30. Huiskamp T. (Sub)nanosecond transient plasma for atmospheric plasma processing experiments: application to ozone generation and NO removal / T. Huiskamp, W.F.L.M. Hoeben, F.J.C.M. Beckers, E.J.M. van Heeschand, A.J.M. Pemen // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – Vol. 50, No. 40. – URI: <http://10.1088/1361-6463/aa8617>.
31. Roy N.C. OH and O radicals production in atmospheric pressure air/Ar/H<sub>2</sub>O gliding arc discharge plasma jet / N.C. Roy, M.R. Talukder, A.N. Chowdhury // Plasma Science and Technology. – 2017. – Vol. 19, No. 12. – URI: <http://10.1088/2058-6272/aa86a7>.
32. Pongric B. Fast imaging of intermittent electro-spraying of water with positive corona discharge / B. Pongric, H.H. Kim, M. Janda, V. Martisovits, Z. Machala // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2014. – Vol. 47, No. 31. – URI: <http://10.1088/0022-3727/47/31/315202>.
33. Богуславський Л.З., Кучеренко В.В., Брустецький Е.В. Пат. 15940 А, Україна. Устрійство для обробки жидкости електрическим разрядом. 1997.
34. Wang X. Characteristics of Electrode-Water-Electrode Discharge and its Application to Water Treatment / X. Wang, Z. Li, X. Zhang, L. Lei // Plasma Science and Technology. – 2014. – Vol. 16, No. 5.
35. Wang X. High Conductivity Water Treatment Using Water Surface Discharge with Nonmetallic Electrodes / X. Wang, X. Zhang, L. Lei // Plasma Science and Technology. – 2013. – Vol. 15, No. 6.
36. Shang K. Activation of peroxydisulfate by gas-liquid pulsed discharge plasma to enhance the degradation of p-nitrophenol / K. Shang, H. Wang, J. Li, N. Lu, N. Jiang, Y. Wu // Plasma Science and Technology. – 2017. – Vol. 19, No. 6. – URI: <http://10.1088/2058-6272/aa6616>.
37. Lukes P. Generation of ozone by pulsed corona discharge over water surface in hybrid gas-liquid electrical discharge reactor / P. Lukes, M. Clupek, V. Babicky, V. Janda, P. Sunka // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2005. – Vol. 38, No. 3. – URI: <http://10.1088/0022-3727/38/3/010>.
38. Rodriguez-Mendez B.G. Bacterial inactivation in water by means of a combined process of pulsed dielectric barrier discharge and silver-modified natural zeolite / B.G. Rodriguez-Mendez, R. Lopez-Callejas, M.T. Olguin, A.N. Hernandez-Arias, R. Valencia-Alvarado, R. Pena-Eguiluz, A. Mercado-Cabrera, D. Alcantara-Diaz, A.E. Munoz-Castroand, A. de la Piedad-Beneitez // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2014. – Vol. 47, No. 23. – URI: <http://10.1088/0022-3727/47/23/235401>.
39. Takeuchi N. Modelling chemical reactions in dc plasma inside oxygen bubbles in water / N. Takeuchi, Y. Ishii, K. Yasuoka // Plasma Sources Science and Technology. – 2012. – Vol. 21, No. 1.
40. Uehara S. Development of a capillary plasma pump with vapour bubble for water purification: experimental and theoretical investigation / S. Uehara, K. Ishihataand, H. Nishiyama // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2016. – Vol. 49, No. 40.
41. Sohbatzadeh F. Effect of electrical discharge in water on concentration of nitrate solution / F. Sohbatzadeh, H. Bagheri, R. Safari // Chinese Physics B. – 2017. – Vol. 26, No. 2.
42. Яворовський Н.А. Импульсный барьерный разряд как метод обработки воды: активные частицы-окислители в водовоздушном потоке / Н.А. Яворовський, Я.И. Корнев, С.В. Прейс, С.С. Пельцман, М.Б. Хаскельберг, Б.Н. Чен // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 2. – С. 108-113.
43. Baroch P. Special type of plasma dielectric barrier discharge reactor for direct ozonization of water and degradation of organic pollution / P. Baroch, N. Saito, O. Takai // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – Vol. 41, No. 8. – URI: <http://10.1088/0022-3727/41/8/085207>.
44. Kim M.H. Efficient generation of ozone in arrays of micro-channel plasmas / M.H. Kim, J.H. Chol, S.B. Ban, R.Y. Choi, E.J. Kwon, S.-J. Parkand, J.G. Eden // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2013. – Vol. 46, No. 30. – URI: <http://10.1088/0022-3727/46/30/305201>.
45. Wu H. Degradation of Aniline Wastewater Using Dielectric Barrier Discharges at Atmospheric Pressure / H. Wu, Z. Fang, Y. Xu // Plasma Science and Technology. – 2015. – Vol. 17, No. 3.
46. Abdelaziz A.A. Characterization of surface dielectric barrier discharge influenced by intermediate frequency for ozone production / A.A. Abdelaziz, T. Ishijima, T. Seto, N. Osawa, H. Wedaa, Yo. Otani // Plasma Sources Science and Technology. – 2016. – Vol. 25, No. 3. – URI: <http://10.1088/0963-0252/25/3/035012>.
47. Barillas L. Design of a Prototype of Water Purification by Plasma Technology as the Foundation for an Industrial Wastewater Plant / L. Barillas // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 591, conf. 1. – URI: <http://10.1088/1742-6596/591/1/012057>.
48. Quyen N.T. Improvement of water quality using dielectric barrier discharge plasma / N.T. Quyen, T. Traikoo, R. Nitisoravut, T. Onjun // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 860, conf. 1.
49. Wang B. A novel large-scale plasma source: two discharge modes and their correlation to the production of aqueous reactive species / B. Wang, D. Liu, Z. Zhang, Q. Li, Z. Liu, L. Guo, X. Wang, M. G. Kong // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – Vol. 50, No. 30. – URI: <http://10.1088/1361-6463/aa7a90>.
50. Neretti G. Characterization of a dielectric barrier discharge in

contact with liquid and producing a plasma activated water / G. Neretti, M. Taglioli, G. Colonna, C.A. Borghi // Plasma Sources Science and Technology. – 2017. – Vol. 26, No 1. – URI: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6595/26/1/015013/meta>.

51. Kuskova N.I. Spark discharges in condensed media / N.I. Kuskova // Technical Physics. – 2001. – Vol. 46, iss. 2. – P. 182-185.

52. Bruggeman P. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids / P. Bruggeman, C. Leys // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – Vol. 42, No 5.

#### References(transliterated):

1. Kul'skiy L.A. Teoreticheskie osnovy i tekhnologiya konditsionirovaniya vody [Theoretical basis and technology of water conditioning]. Kiev, Nauk. dumka, 1971. 506 p.

2. Grebenyuk V.D., Sobolevskaya T.T., Makhno A.G. Sostoyanie i perspektivy razvitiya metodov ochistki stochnykh vod gal'vanicheskikh proizvodstv. Khimiya i tekhnologiya vody. 1989. Vol. 11, no. 5. P. 407-421.

3. Yutkin L.A. Elektrogidravlicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti. SPb, "Mashinostroeniye", 1986. 252 p.

4. Zykina L.N., Goldaev B.C. Obezrazzhivaniye rechnoy vody vysokovol'tnymi razryadami. Elektronnyaya obrabotka materialov. 1974. No. 2. P. 67-68.

5. Ryazanov N.D., Perevyazkina E.H. Deystvie obezrazzhivayushchikh faktorov impul'snogo elektricheskogo razryada v vode. Elektronnyaya obrabotka materialov. 1984. No. 2. P. 43-45.

6. Boguslavskiy L.Z., Zhuk I.A., Krivitskiy E.V., Skorykh V.V. Ustroystvo dlya obrabotki vody elektricheskimi razryadami. Patent Rossiya, No. 1820697, 1993.

7. Boguslavskiy L.Z., Krivitskiy E.V., Petrichenko V.N. Plazmennyye fil'try dlya obezrazzhivaniya stochnykh vod. Elektronnyaya obrabotka materialov. 1995. No. 2. P. 22-26.

8. Petrichenko S.V. Prot'yazhennyy koronnyy razryad v sil'nykh vodnykh elektrolitakh. Elektronnyaya obrabotka materialov. 2005. No. 2. P. 58-63.

9. Petrichenko S.V. Control of the discharge plasma effective volume at the contact electrospark process in liquid. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2008. Vol. 44, iss. 3. P. 169-174.

10. Levchenko V.F., Sergeenkov V.P., Tyutyunik M.G. Opytno-promyshlennyy reaktor ochistki vody po elektroimpul'snoy tekhnologii. Elektricheskyy razryad v zhidkosti i ego primeneniye v promyshlennosti. Nikolaev, 1988. Part 2. 227 p.

11. Levchenko V.F. Elektroimpul'snyy metod kompleksnoy pererabotki materialov. Problemy mashinostroeniya. 1992. Iss. 38. P. 78-86.

12. Yushchishina A.N., Zubenko A.A., Petpichenko L.A., Malyushevskaya A.P., Smal'ko A.A., Khaynatskiy S.A. Sedimentatsionnyye kharakteristiki elektrorazryadnykh gidroksidov alyuminiya i zheleza. Elektronnyaya obrabotka materialov. 2005. No. 3. P. 46-50.

13. Khaynatskiy S.A., Zubenko A.A., Smal'ko A.A. Eksperimental'noye issledovaniye nekotorykh zakonomernostey erozii alyuminiyevykh i zheleznykh granul pri vysokovol'tnykh elektricheskikh razryadakh v reaktore s metallicheskoy zagruzkoj. Elektronnyaya obrabotka materialov. 2005. No.4. P. 62-65.

14. Khainatskii S.A. Zubenko A.A., Petrichenko L.A., Smal'ko A.A., Kreshchenko V.A., Ponomarenkoand N.E., Tyurina T.V. Removal of heavy-metal ions from water by means of high-voltage discharges in reactors with a granulated metal charge. II. Industrial galvanic wastewater. Surface Engineering And Applied Electrochemistry. 2005. No. 6. P. 44-49.

15. Khainatskii S.A., Zubenko A.A., Petrichenko L.A., Smal'ko A.A., Kreshchenko V.A., Kovalenko V.L. Removal of heavy-metal ions from water by means of high-voltage discharges in

reactors with a granulated metal charge. I. Model solutions. Surface Engineering And Applied Electrochemistry. 2005. No. 6. P. 50-55.

16. Danilenko N.B., Savel'ev G.G., Yavorovskiy N.A., Yurmazova T.A. Khimicheskie reaktsii pri deystvii impul'snykh elektricheskikh razryadov na aktivnyuyu metallicheskuyu zagruzku v rastvore soley xpoma (VI). Zhurnal Prikladnoy Khimii. 2007. Vol. 80, no 1. P. 88-94.

17. Lobanova G.L., Yurmazova T.A., Shiyan L.N., Voyno D.A. Investigation of the mechanism of microplasma impact on iron and aluminum load using solutions of organic substances. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 81. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/81/1/012076/meta>.

18. Lobanova G.L., Yurmazova T.A., Shiyan L.N., Machekhina K.I. Electropulse treatment of water solution of humic substances in a layer iron granules in process of water treatment. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 110. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/110/1/012098/pdf>.

19. Lobanova G.L., Yurmazova T.A., Shiyan L.N., Machekhina K.I., Davidenko M.A. Destruction of humic substances by pulsed electrical discharge. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 168. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/168/1/012012>.

20. Parkansky N., Yakubov V., Beilis I.I., Boxma R.L., Berkh O. Electrode erosion during submerged arc treatment of methylene blue water solution. Journal of Physics D: Applied Physics. 2015. Vol. 48, no. 22. Available at: <http://10.1088/0022-3727/48/22/225202>.

21. Badalyan A.M., Polyakov O.V., Sorokin A.M., Podgornaya E.K. Vysokoeffektivnyy metod unichtozheniya organicheskikh zagryazneniy v vode. Pis'ma v ZhTF. 1996. Vol. 22, no 15. P. 20.

22. Bugaenko L.T., Kalinina T.A., Kovalev G.V., Sizikov A.M. Mekhanizm razrusheniya uglevodorodov v vodnoyemul'sii pod deystviem anodnykh mikrorazryadov. Khimiya vysokikh energiy. 2004. Vol. 38, no 2. P. 143-150.

23. Piskarev I.M. Vybor usloviy elektricheskogo razryada pri generirovaniy khimicheski aktivnykh chastits dlya razlozheniya primesey v vode. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 1999. Vol. 69, iss. 1. P. 58-65.

24. Sugama Chie, Tochikubo Fumiyoshi, Uchida Satoshi. Glow Discharge Formation over Water Surface at Saturated Water Vapor Pressure and Its Application to Wastewater Treatment. Japanese Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 45, no. 11. P. 8858-8863.

25. Belinskiy V.V., Bozhko I.V., Charnyy D.V. Impul'snyy koronnyy razryad na poverkhnost' elektroprovodyashchey zhidkosti i ego ispol'zovaniye dlya obrabotki vody. Tekhnicheskaya elektrodinamika. 2010. No 3. P. 21-27.

26. Boguslavskiy L.Z., Kazaryan Yu.G., Struk Ya.P., Kunizhenkov V.V., Yaroshinskiy M.S. Ustanovka dlya znezharzhennya vodi. Patent Ukraine, no. 99276, 2015.

27. Grabowski L.R., van Veldhuizen E.M., Pemenand A.J.M., Rutgers W.R. Breakdown of methyleneblue and methylorange by pulsed corona discharge. Plasma Sources Science and Technology. 2007. Vol. 16, no. 2. Available at: <http://10.1088/0963-0252/16/2/003>.

28. Boguslavskiy L.Z., Yaroshinskiy N.S. Ustanovka dlya obezrazzhivaniya vody vysokochastotnym strimernym razryadom. Zbirnik naukovikh prats' natsional'nogo universitetu korablebuduvannya. Mykolayiv, 2015. No. 5. P. 88-93.

29. Marotta E., Schiorlin M., Rea M., Paradisi C. Products and mechanisms of the oxidation of organic compounds in atmospheric air plasmas. Journal of Physics D: Applied Physics. 2010. Vol. 43, no. 12. Available at: [74](http://10.1088/0022-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

3727/43/12/124011.

30. Huiskamp T., Hoeben W.F.L.M., Beckers F.J.C.M., van Heeschand E.J.M., Pemen A.J.M. (Sub)nanosecond transient plasma for atmospheric plasma processing experiments: application to ozone generation and NO removal. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017. Vol. 50, no. 40. Available at: <http://10.1088/1361-6463/aa8617>.
31. Roy N.C., Talukder M.R., Chowdhury A.N. OH and O radicals production in atmospheric pressure air/Ar/H<sub>2</sub>O gliding arc discharge plasma jet. *Plasma Science and Technology*. 2017. Vol. 19, no. 12. Available at: <http://10.1088/2058-6272/aa86a7>.
32. Pongric B., Kim H.H., Janda M., Martisovits V., Machala Z. Fast imaging of intermittent electrospaying of water with positive corona discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014. Vol. 47, no. 31. Available at: <http://10.1088/0022-3727/47/31/315202>.
33. Boguslavskiy L.Z., Kucherenko V.V., Bristetskii E.V. Ustroystvo dlya obrabotki zhidkosti elektricheskim razryadom. Patent Ukraine, no. 15940 A, 1997.
34. Wang X., Li Z., Zhang X., Lei L. Characteristics of Electrode-Water-Electrode Discharge and its Application to Water Treatment. *Plasma Science and Technology*. 2014. Vol. 16, no. 5.
35. Wang X., Zhang X., Lei L. High Conductivity Water Treatment Using Water Surface Discharge with Nonmetallic Electrodes. *Plasma Science and Technology*. 2013. Vol. 15, no. 6.
36. Shang K., Wang H., Li J., Lu N., Jiang N., Wu Y. Activation of peroxydisulfate by gas-liquid pulsed discharge plasma to enhance the degradation of p-nitrophenol. *Plasma Science and Technology*. 2017. Vol. 19, no. 6. Available at: <http://10.1088/2058-6272/aa6616>.
37. Lukes P., Clupek M., Babicky V., Janda V., Sunka P. Generation of ozone by pulsed corona discharge over water surface in hybrid gas-liquid electrical discharge reactor. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005. Vol. 38, no. 3. Available at: <http://10.1088/0022-3727/38/3/010>.
38. Rodriguez-Mendez B.G., Lopez-Callejas R., Olgun M.T., Hernandez-Arias A.N., Valencia-Alvarado R., Pena-Eguiluz R., Mercado-Cabrera A., Alcantara-Diaz D., Munoz-Castroand A.E., de la Piedad-Beneitez A. Bacterial inactivation in water by means of a combined process of pulsed dielectric barrier discharge and silver-modified natural zeolite. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014. Vol. 47, no. 23. Available at: <http://10.1088/0022-3727/47/23/235401>.
39. Takeuchi N., Ishii Y., Yasuoka K. Modelling chemical reactions in dc plasma inside oxygen bubbles in water. *Plasma Sources Science and Technology*. 2012. Vol. 21, no. 1.
40. Uehara S., Ishihataand K., Nishiyama H. Development of a capillary plasma pump with vapour bubble for water purification: experimental and theoretical investigation. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2016. Vol. 49, no. 40.
41. Sohbatzadeh F., Bagheri H., Safari R. Effect of electrical discharge in water on concentration of nitrate solution. *Chinese Physics B*. 2017. Vol. 26, no. 2.
42. Yavorovskiy N.A., Kornev Ya.I., Preys S.V., Pel'tsman S.S., Khaskel'berg M.B., Chen B.N. Impul'snyy bar'ernyy razryad kak metod obrabotki vody: aktivnye chastitsy-okisliteli v vodo-vozdushnom potoke. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2006. Vol. 309, no 2. P. 108-113.
43. Baroch P., Saito N., Takai O. Special type of plasma dielectric barrier discharge reactor for direct ozonization of water and degradation of organic pollution. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41, no 8. Available at: <http://10.1088/0022-3727/41/8/085207>.
44. Kim M.H., Cho1 J.H., Ban S.B., Choi R.Y., Kwon E.J., Parkand S-J., Eden J.G. Efficient generation of ozone in arrays of microchannel plasmas. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2013. Vol. 46, no 30. Available at: <http://10.1088/0022-3727/46/30/305201>.
45. Wu H., Fang Z., Xu Ya. Degradation of Aniline Wastewater Using Dielectric Barrier Discharges at Atmospheric Pressure. *Plasma Scienceand Technology*. 2015. Vol. 17, no. 3.
46. Abdelaziz A.A., Ishijima T., Seto T., Osawa N., Wedaa H., Otani Yo. Characterization of surface dielectric barrier discharge influenced by intermediate frequency for ozone production. *Plasma Sources Science and Technology*. 2016. Vol. 25, no. 3. Available at: <http://10.1088/0963-0252/25/3/035012>.
47. Barillas L. Design of a Prototype of Water Purification by Plasma Technology as the Foundation for an Industrial Wastewater Plant. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Vol. 591, conf. 1. Available at: <http://10.1088/1742-6596/591/1/012057>.
48. Quyen N.T., Traikoo T., Nitorisavut R., Onjun T. Improvement of water quality using dielectric barrier discharge plasma. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 860, conf. 1.
49. Wang B., Liu D., Zhang Z., Li Q., Liu Z., Guo L., Wang X., Kong M.G. A novel large-scale plasma source: two discharge modes and their correlation to the production of aqueous reactive species. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017. Vol. 50, no 30. Available at: <http://10.1088/1361-6463/aa7a90>.
50. Neretti G., Taglioli M., Colonna G., Borghi C.A. Characterization of a dielectric barrier discharge in contact with liquid and producing a plasma activated water. *Plasma Sources Science and Technology*. 2017. Vol. 26, no 1. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6595/26/1/015013/meta>.
51. Kuskova N.I. Spark discharges in condensed media. *Technical Physics*. 2001. Vol. 46, iss. 2. P. 182-185.
52. Bruggeman P., Leys C. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009. Vol. 42, no 5.

Поступила (received) 22.03.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Хайнацький Сергій Олександрович (Хайнацкий Сергей Александрович, Khainatskyu Sergey Aleksandrovich)** – Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, науковий співробітник, м. Миколаїв, Україна; e-mail: [Khainatskyu@gmail.com](mailto:Khainatskyu@gmail.com)

**Христо Олександр Іванович (Христо Александр Иванович, Khrysto Oleksandr Ivanovich)** – кандидат технічних наук, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, науковий співробітник, м. Миколаїв, Україна; e-mail: [alexander.khristo@ukr.net](mailto:alexander.khristo@ukr.net)

**Шведов Леонід Петрович (Шведов Леонид Петрович, Shvedov Leonid Petrovich)** – Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, провідний інженер, м. Миколаїв, Україна; e-mail: [defr@iipr.com.ua](mailto:defr@iipr.com.ua)

УДК 621.317.3

*V.V. KNAZIEV, S.I. MELNIK***ASSESSMENT OF PROBABILITY OF LIGHTNING DIRECT STRIKE INTO ELEMENTS OF STATIONARY GROUND LAUNCH COMPLEX**

Materials presented in the paper are the first stage of realization of methodology of ensuring the required level of protection of rocket space complexes from destabilizing action of lightning. The methodology is an obligatory element of ensuring a life cycle of the complexes and is logically integrated into the system of standards of IEC 61508 series. The presented first stage includes a calculated estimation of probability of lightning direct strike into elements of the complex. The estimation was carried out with using a method based on calculation of distribution of intensity of stationary electric field over the surface of objects of the complex. It is shown that it is sufficient to use only a variant of vertical, in relation to the ground surface, vector of intensity of electric field created by a thundercloud.

**Key words:** lightning, rocket space complexes; probability, direct strike, electric field.

*V.V. КНЯЗЕВ, С.И. МЕЛЬНИК***ОЦІНКА ЙМОВІРНОСТІ ПРЯМОГО УДАРУ БЛИСКАВКИ В ЕЛЕМЕНТИ СТАЦІОНАРНОГО НАЗЕМНОГО ПУСКОВОГО КОМПЛЕКСУ**

Матеріали, представлені в доповіді є першим етапом реалізації методології забезпечення необхідного рівня захисту ракетних космічних комплексів від дестабілізуючої дії блискавки. Методологія є обов'язковим елементом забезпечення життєвого циклу комплексів і логічно вбудовується в систему стандартів серії IEC 61508. Представлений перший етап включає розрахункову оцінку ймовірності прямого удару блискавки в елементи комплексу. Оцінка проведена з використанням методу, заснованого на розрахунку розподілу напруженості стаціонарного електричного поля по поверхні об'єктів комплексу. Показано, що досить використовувати тільки варіант вертикального по відношенню до поверхні землі вектора напруженості електричного поля, створюваного грозовою хмарою.

**Ключові слова:** блискавка, космодром, ймовірність, прямий удар, електричне поле.

*V.V. КНЯЗЕВ, С.И. МЕЛЬНИК***ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ПРЯМОГО УДАРА МОЛНИИ В ЭЛЕМЕНТЫ СТАЦИОНАРНОГО НАЗЕМНОГО ПУСКОВОГО КОМПЛЕКСА**

Материалы, представленные в докладе являются первым этапом реализации методологии обеспечения требуемого уровня защиты ракетных космических комплексов от дестабилизирующего действия молнии. Методология является обязательным элементом обеспечения жизненного цикла комплексов и логично встраивается в систему стандартов серии IEC 61508. Представленный первый этап включает расчетную оценку вероятности прямого удара молнии в элементы комплекса. Оценка проведена с использованием метода, основанного на расчете распределения напряженности стационарного электрического поля по поверхности объектов комплекса. Показано, что достаточно использовать только вариант вертикального по отношению к поверхности земли вектора напряженности электрического поля, создаваемого грозовым облаком.

**Ключевые слова:** молния, космодром, вероятность, прямой удар, электрическое поле.

**Introduction**

Lightning discharge is an extremely powerful electromagnetic phenomenon having a destabilizing effect on all systems of a ground stationary launch complex (GSLC), including a carrier rocket and a module placed into orbit. Monitoring and control systems of GSLC are the most vulnerable and dangerous from the viewpoint of possible negative consequences. Lightning discharge produces pulsed electromagnetic interferences that propagate in the form of pulses of voltage and current along circuits of power supply, wire control lines, coupling circuits, earth loops and in the form of pulsed electromagnetic field. At present, harmonization between possible levels of electromagnetic disturbances at a concrete object and immunity levels of equipment installed at this object is not realized in full measure. As a rule, immunity levels of GSLC equipment are specified with use of standards [1-

6]. Naturally, the levels specified in the standards are determined as a result of averaging over different objects. In doing so, characteristic properties of each object in design of its system of lightning protection were not taken into account. Therefore analysis of possible values of parameters of electromagnetic disturbances that can accompany lightning discharge into elements of RSC with a certain probability is a topical problem.

The proposed procedure is a calculated and experimental one. The sequence of operations in realization of calculated estimation of parameters of currents and voltages that can with a certain probability appear at the ports of GSLC equipment is analogous to the recommended in the manual [7] (subsection 5.3.1.5). For a specified appearance of models of RSC, the results of the computer simulation are presented further in section 3.

In the work [8], it is stated that creation of lightning

protection of RSC that ensures a design of protection with minimal weight and price is achieved when designing is carried out in a step-by-step manner by a specified algorithm. The following step-by-step approach was used in developing the design of space vehicle Orion:

- determination of zones of lightning strike in the system;
- determination of parameters of lightning;
- assessment of parameters of effects accompanying lightning;
- development of lightning protection measures;
- verification of sufficiency of protection measures.

As applied to GSLC, a procedure, which is analogous to the procedure presented in the work [9], which includes the following main steps is proposed:

1) determination, by a computational method, of the most probable zones of lightning strike taking into account distribution of probability of lightning current parameters;

2) calculation of parameters of intensities of electric and magnetic fields accompanying lightning in places where RSC elements are situated taking into account screening properties of bodies, buildings and structures;

3) experimental investigation of integrity of ground loops at the object and determination of the value of spreading resistance of lightning current. Development of recommendations on its improvement (if necessary).

4) calculated evaluation and experimental verification of paths of spreading of lightning current when lightning strikes into selected elements of the objects;

5) determination of all components and systems that are critically important, and also any components and systems that can spread direct or indirect lightning effects on critically important components or systems;

6) determination of coefficients of transformation of lightning energy into pulses of voltage and current that propagate by galvanic circuits and enter ports of critically important components of RSC;

7) experimental determination of immunity of critically important systems of RSC to pulses of current, voltage and electromagnetic fields with parameters specified in standards;

8) comparison of requirements of the standards, according to those the tests of item 7 were carried out, with parameters of the influencing currents, voltages and fields determined at the previous steps;

9) determination of necessity to install additional protection devices at the equipment ports and formation of requirements to such devices;

10) verification of sufficiency of the adopted measures for decreasing risks of occurrence of emergency situations at the object due to lightning strike.

In this paper, methods and results of calculation of probability of direct lightning strike into GSLC elements are presented.

**Description of suggested method.** GSLC are complex engineering objects situated at large territory, full of metallic constructions, situated at flat country far from other tall structures. Therefore lightning regularly strikes the territory of such objects. Lightning protection system

of the object is formed, as a rule, by combination of rod and wire rope air terminals. In spite of high level of reliability of such systems, they do not ensure interception of all possible lightnings. Inrushes of lightning into elements that are important for safety of object functioning can cause serious negative consequences.

Modern procedures of assessment of efficiency of lightning protection systems based on formation of protection zones are presented in standards [10, 11]. Construction of zones is carried out with using method of «protection angle» or «rolling sphere». The following discrete values for four levels of reliability of lightning protection are established: 0.99, 0.97, 0.91 and 0.84. Radius of calculated sphere depends on the required level of reliability of interception of lightning with low values of leader potentials («low» lightning currents). Efficiency of zone methods in practice is explained by the fact that they ensure excessive requirements to protection level because a zone must cover the whole building. When protection 0.99 is provided at the external side of a zone, inside the zone, naturally, protection reliability is practically equal 1.

«Low» lightning are the most difficult to intercept, but no less dangerous for equipment. It is such lightning that can strike into the middle or the base of a tall structure. A lightning protection system designed on the basis of rolling sphere radius of 20 m (having the highest regulated reliability) is able theoretically to ensure interception of 99 lightning of 100 striking into protected territory. In practice it can be otherwise because the following important circumstances are not taken into account:

Lightning can pass through the lightning protection system, which is especially characteristic of lightning with potential up to 10 MV (current less 3 kA). Such lightning are few (2%) according to international statistics but that can be caused by insufficient sensitivity of used systems of monitoring. It can be supposed that probability of their occurrence depends on conditions of the concrete region and can reach 5%. Such lightning have high destructive force because can directly strike the most susceptible elements of an object, for example, CR at the launch pad.

Zone methods do not provide the possibility of detailed assessment of probability of lightning strike into objects with large area because they do not take into account real constructions of complexes and their surroundings.

Zone methods realize the principle of minimal distance between the leader of lightning and the grounded element. The principle of minimum of voltage of discharge gap which takes into account oncoming streamers from object elements is closer to the truth.

To assess probability of lightning strike into an object, methods of calculation of induced charges [12] and electrostatic field [8] that are similar in their essence are used. Because the method of induced charges is in fact equivalent to the method of distribution of electric field intensity over the surface of the object, the method of calculation of electric field is used in the framework of this work. An illustration of the results is presented in the next section.

In the work [9], a computer program that allows to obtain the picture of distribution of density of probability

of inrush of lightning over the territory of the object is presented. At the given stage, a variant based on a standardized principle of minimum of the value of the discharge gap («rolling sphere» method) is realized. The essence of this computer model is that the process of orientation of lightning leader is assumed to be initiated when its streamer zone touches the ground, a grounded object or a lightning rod. In this model, it is assumed that lightning strikes into the zone that will be the first zone which will be reached by one of the competing spark channels developing in the streamer zone from the leader channel of lightning in all possible directions to the grounded areas connection with those ensures formation of galvanically closed circuit.

The probability of occurrence of lightning return current strength exceeding a specified value is presented graphically in the standard [10]. For the purposes of this work, an analytical approximation of this dependence from the work [13], in the form of formula (1), is used.

$$P(I) = [1 + (I/a)^b]^{-1}, \quad (1)$$

where:  $P(I)$  – probability that a current strength of descending negative lightning exceeds the value  $I$ ;  $I$ , kA – the value of current of descending negative lightning;  $a = 31$ ;  $b = 2.6$ .

It is natural that the value of current is related to the value of the cloud potential. In its turn, a radius of the rolling sphere is determined by the value of voltage at the gap of leader head – place of strike. To take account of this statistical characteristic in the framework of the proposed method for descending negative lightning, formula (2) presented in standard [10] was used. It should be noted that the dependencies (1) and (2) can be changed when new knowledge will be obtained.

$$R = 10 \cdot I^{0.65}, \quad (2)$$

where:  $R$ , m – a breakdown distance (radius) in the «rolling sphere» method;  $I$ , kA – lightning current strength.

From equation (2), it is easy to determine the maximal value of lightning current strength which can overcome a lightning protection system formed from combination of rod air terminals (masts) and lightning protection ropes. Such systems are usually used at space launching sites. The dependence of the maximal value of current strength ( $I$ , kA) on the minimal distance ( $R_{\min}$ , m) between the elements is presented in Figure 1.

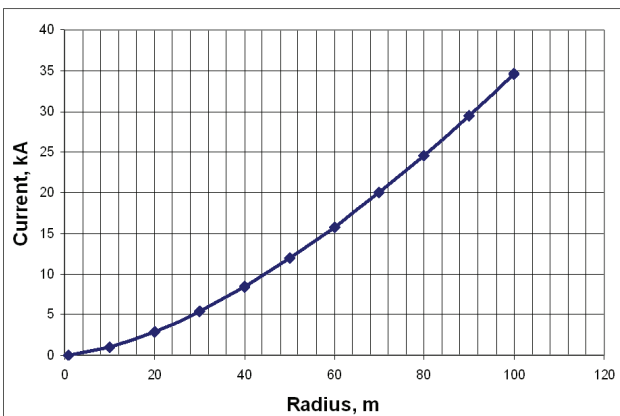


Figure 1 – Dependence of the maximal value of current strength on the minimal distance  $R_{\min}$  between the elements

The probability of occurrence of lightning at the given territory with current strength which is less than that determined by Figure 1 is taken from the curves of distribution that are plotted from the results of processing of long-term observations. The averaged values can be taken from standard [10].

The proposed statistical approach has the following advantages:

1. It is possible to obtain data on probability of strike into one or another object with any degree of detail.

2. Creation of lightning protection system is possible with taking into account optimization of reliability-cost at the expense of detailed knowledge of the most probable zones of inrush of lightning into critical elements of the object.

3. In providing a specified level of reliability of lightning protection system, it is possible to take into account statistical peculiarities of lightning parameters in the location of the object (on condition that such data are available).

4. «Attraction» zone of lightning above the object is calculated automatically which radically improves reliability of the results in comparison to the data obtained with using formulae from standard [14]. These formulae will be discussed below.

Let us consider characteristic features of GSLC. As an example, consider GSLC presented in Figure 2. Assume that the height of masts of lightning protection is 80 m, the number of masts is 4, a distance between the masts is 72 m; masts serve as downward conductors; protection rope – between the masts. In this case the minimal distance is  $R_{\min} = 36$  m. The maximal value of current strength of lightning that can overcome the lightning protection system is, according to Figure 1, 5,42 kA.



Figure 2 – Ground launch complex (appearance)  
[<https://www.flickr.com/groups/ares/pool>]

An important feature of the stationary complex is that presence of rod air terminals (masts) 80 m in height increases essentially the probability of lightning strike comparing to the average density of probability of lightning in this region. The effect is caused by attraction of lightning from large distances which leads to an increase in «attraction area». An empirical formula (3) for calculation of the «attraction area» was taken from standard [14].

$$A_D = L \cdot W + 6 \cdot H \cdot (L + W) + 9 \pi \cdot (H)^2, \quad (3)$$

where:  $L$ ,  $W$  and  $H$  – length, width and height of the object, respectively (m).

Results obtained with using formula (3) do not take into account connection with lightning current strength and therefore are not suitable for assessment of the number of lightning strikes into CR (when current strength is 5,42 kA). The number of strikes ( $N_D$ ) of lightning into the object per a year is estimated with formula (4) [14].

$$N_D = N_G \cdot A_D \cdot C_D \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

where:  $N_G$  – the density of lightning strikes during a year per  $\text{km}^2$  in the region of object location;  $A_D$  – attraction area determined by formula (3) in  $\text{m}^2$ ;  $C_D$  – coefficient given in Table 1.

Table 1 – The values of coefficient  $C_D$

Conditions of location	$C_D$
Object is surrounded by the higher objects	0.25
Object is surrounded by objects commensurable in height or lower	0.5
Isolated object: there are no other objects near it	1.0
Isolated object at the top of hill or hillock	2.0

$N_G$  can be estimated by the number ( $T_D$ ) of thunderstorm days per year according to empirical formula (5) [14].

$$N_G = 0.1 \cdot T_D. \quad (5)$$

At the initial stage of flight, a flare from the engine causes an increase in effective height  $H$  which increases attraction area  $A_D$  and, respectively, the probability of lightning strike into CR. It is important that in this case a lightning current strength will be no longer limited by lightning protection system. For this reason, various methods of monitoring thunderstorm environment are used and criteria of permissibility of launch as to thunderstorm danger are strictly regulated.

Results of calculation of zones of probable strike of lightning into GSLC obtained by the method of numerical simulation of electrostatic field are presented onward.

**Numerical realization of the method of determination of probability of lightning strike into object elements by distribution of electrostatic field.** To obtain a solution the mode Electrostatics, Boundary Elements (*esbe*) which is situated in the module AC/DC COMSOL is used который находится в модуле AC/DC COMSOL. The mode allows to carry out computations of distribution of potential in dielectrics in conditions when distribution of electric potential ( $V_S$ ) at boundaries is specified. The solution is based on the method of finite

elements. The Laplace equation (6) is being solved for scalar electric potential ( $V$ ) as a dependent variable.

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla V) = 0. \quad (6)$$

The external boundary at which a distribution of potential ( $V_S$ ) is specified is selected in the form of a spherical shell which allows to change easily a direction of the vector of initial uniform electrostatic field ( $E_0$ ). A three-dimensional model of GSLC (analogous to the presented in Fig. 2) with a plotted grid is presented in Figure 3.

The value of magnitude of intensity  $E_0$  is assumed to be 10 kV/m which is typical of before-storm environment [15]. The following procedure of ranking of probable zones of direct lightning strike was realized:

- calculation of the surface integral of modulus of electric field intensity for assigned zones of possible direct lightning strike and probable directions of movement of thunderstorm cloud field;
- averaging of obtained values over directions of vector of electric field of thundercloud for each zone taking into account weight factors calculated at the previous stage;
- smoothing of obtained results taking into account stochastic factor.

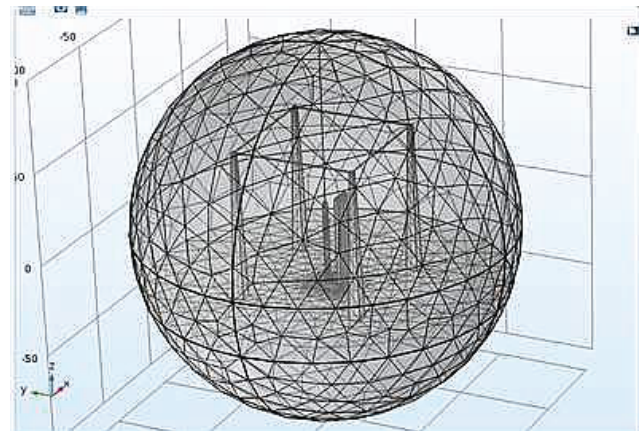


Figure 3 – Three-dimensional model of GSLC with plotted grid

The result of calculation of distribution of electric field intensity over the surface of GSLC elements under vertical direction of vector  $E_0$  is presented in Figure 4.

Results of assessment of probability of lightning strike into object elements in the case of vertical direction of vector  $E_0$  are presented in Table 2.

Comparison of results presented in Table 2 with results of averaging over possible directions of vector of electric field intensity of thundercloud shows insignificant difference (less than 2%). Therefore, in calculation of probability of lightning strike into elements of ground RSC, it is possible to limit oneself by calculation only of vertically directed vector of electric field intensity.

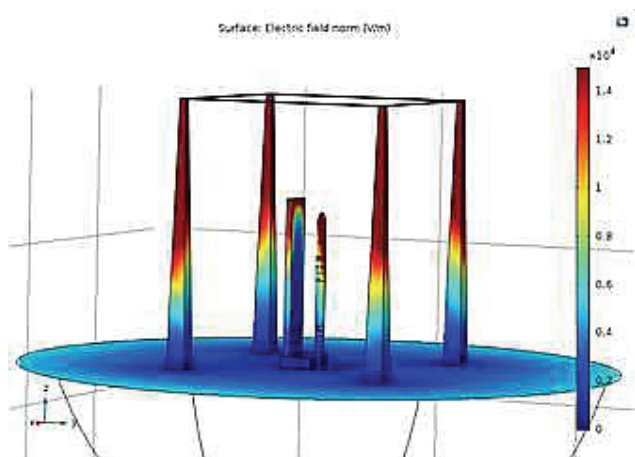


Figure 4 – Result of calculation of distribution of electric field intensity over the surface of GSLC elements under vertical direction of vector  $E_0$

Table 2 – Results of assessment of probability of lightning strike into object elements

Zone of probable damage by direct lightning strike	Integral E over surface of zone, (V/m)	Probability of damage of zone by direct lightning strike, (%)	Probability of damage of zone taking account of stochastic factor, (%)
The higher part of mast 1	1.2839E7	21.73	21.35
The higher part of mast 2	1.2839E7	21.73	21.35
The higher part of mast 3	1.2839E7	21.73	21.35
The higher part of mast 4	1.2839E7	21.73	21.35
Connecting ropes	3.8223E6	6.48	7.23
The higher part of service tower	1.9056E6	3.20	3.60
The higher part of CR	1.9972E6	3.40	3.77

**Conclusion.** The first stage of the methodology of ensuring the required level of protection of RSCs from destabilizing action of lightning has been presented.

Method of calculated assessment of probability of direct lightning strike into elements of the complex based on calculation of distribution of intensity of stationary electric field over the surface of objects of the complex is efficient. It is shown that it is sufficient to use only a variant of vertical, relative to the ground surface, vector of intensity of electric field created by a thundercloud.

Method of statistical assessment of probability of lightning strike that takes into account probability of occurrence of lightning as function of lightning return stroke current strength has important advantages. This allows to elaborate zones of possible lightning strike for «low» lightning.

#### References:

1. ECSS-E-ST-20-07C:2012 Space engineering. Electromagnetic compatibility / ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, the Netherlands. 2012. – 91 p.
2. SMC Standard SMC-S-008 Electromagnetic compatibility

requirements for space equipment and systems / Space and missile systems center Standard. Air force space command USA, 2008. – 123 p.

3. MIL-STD-1542-1991 Electromagnetic compatibility and grounding requirements for space system facilities / USAF Space Systems Division, 1991.-52 p.

4. RTCA/DO-160G:2011 Environmental conditions and test. Procedures for airborne equipment. 2011. – 438 p.

5. MIL-STD-461G:2011 Department of defense interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment / Department of Defense USA, 2015. – 280 p.

6. MIL-STD-464C:2010 Interface standard. Electromagnetic environmental effects. Requirements for systems / Department of defense USA, 2010. – 165 p.

7. ECSS-E-HB-20-07A:2012 Hand Book for EMC / ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, the Netherlands. 2012. – 228 p.

8. Scully R. Lightning Protection for the Orion Space Vehicle / R. Scully. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150009504> 2017-10-19T23:18:24+00:00Z.

9. Kniaziev V. Determination of the Necessary Levels of Sustainability of the Automated Control Systems to Electromagnetic Interference from Lightning Discharge / V. Kniaziev // Proc. 25<sup>th</sup> National Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance, September 2015. – Technical University, Sofia, Bulgaria.

10. IEC 62305-1:2010 (Ed.2) Protection against Lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard / IEC, Geneva, Switzerland, 2010. – 160 p.

11. ВСП 22-02-07 Нормы по проектированию, устройству и эксплуатации молниезащиты объектов военной инфраструктуры. МО РФ. – М. – 168 с.

12. Александров Г.Н. Молния и молниезащита / Г.Н. Александров // Ин-т электрофизики и электроэнергетики РАН. – М.: Наука, 2008. – 274 с.

13. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications 15. Lightning Electromagnetics // IET Power and Energy Series 62 // Institute of Engineering and Technology. – London, UK, 2012. – 917 p.

14. IEC 62305-2:2010 Protection against lightning – Part 2: Risk management. – IEC, Geneva, Switzerland, 2010. – 88 p.

15. IEC 62793:2016 Protection against lightning - Thunderstorm warning systems.

#### Bibliography (transliterated):

1. ECSS-E-ST-20-07C:2012 Space engineering. Electromagnetic compatibility. ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, the Netherlands. 2012. 91 p.

2. SMC Standard SMC-S-008 Electromagnetic compatibility requirements for space equipment and systems. Space and missile systems center Standard. Air force space command USA, 2008. 123 p.

3. MIL-STD-1542-1991 Electromagnetic compatibility and grounding requirements for space system facilities. USAF Space Systems Division, 1991. 52 p.

4. RTCA/DO-160G:2011 Environmental conditions and test. Procedures for airborne equipment. 2011. 438 p.

5. MIL-STD-461G:2011 Department of defense interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interfer-



ence. Characteristics of subsystems and equipment. Department of Defense USA, 2015. 280 p.

6. MIL-STD-464S:2010 Interface standard. Electromagnetic environmental effects. Requirements for systems. Department of defense USA, 2010. 165 p.

7. ECSS-E-HB-20-07A:2012 Hand Book for EMC / ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, the Netherlands. 2012. 228 p.

8. Scully R. Lightning Protection for the Orion Space Vehicle. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150009504> 2017-10-19T23:18:24+00:00Z.

9. Kniaziev V. Determination of the Necessary Levels of Sustainability of the Automated Control Systems to Electromagnetic Interference from Lightning Discharge. Proc. 25th National Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance, September 2015, Tehnical University, Sofia, Bulgary.

10. IEC 62305-1:2010 (Ed.2) Protection against Lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard. IEC, Geneva, Switzerland, 2010. 160 p.

11. VSP 22-02-07 Normy po proektirovaniju, ustrojstvu i jekspluatacii molniezashhity ob#ektov voennoj infrastruktury. MO RF. Moscow. 168 p.

12. Aleksandrov G.N. Molnija i molniezashhita. In-t jelektrofizi-ki i jelektrojenergetiki RAN. Moscow: Nauka, 2008. 274 p.

13. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications 15. Lightning Electromagnetics. IET Power and Energy Series 62. Institute of Engineering and Technology, London, UK, 2012. 917 p.

14. IEC 62305-2:2010 Protection against lightning – Part 2: Risk management. IEC, Geneva, Switzerland, 2010. 88 p.

15. IEC 62793:2016 Protection against lightning. Thunderstorm warning systems.

*Надійшла (received) 26.03.2018*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Князєв Володимир Володимирович (Князєв Владимир Владимирович, Kniaziev Volodymyr Volodymyrovych)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел./факс: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua

**Мельнік Сергій Іванович (Мельник Сергей Иванович, Mel'nik Sergiy Ivanovych)** – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник Інституту радіофізики та електроніки НАНУ імені О.Я. Усикова; e-mail: smelnyk@yandex.ua

## ЗМІСТ

<i>Бакіко В.М., Гребінь О.П., Швайченко В.Б.</i> Визначення впливу імпедансу мережі змінного струму на ефективність фільтрації завад звукотехнічних систем . . . . .	3
<i>Бакіко В.М., Попович П.В., Швайченко В.Б.</i> Визначення завадостійкості каналу зв'язку за випадкового впливу завад . . . . .	7
<i>Баранов М.И.</i> Расчетная оценка основных энергетических характеристик грозового облака тропосферы земли . . . . .	11
<i>Богуславський Л.З., Козирєв С.С., Овчиннікова Л.Є., Адамчук Ю.О., Чушак С.В.</i> Умови запалювання об'ємного розряду в системах електрофільтрації газів . . . . .	15
<i>Бондаренко А.Ю.</i> Плоский индуктор с двумя источниками питания для магнитно-импульсного притяжения участка металлического листа . . . . .	20
<i>Гетьман А.В., Резинкин О.Л.</i> Методология экспериментального определения сферических гармоник магнитного поля технических объектов . . . . .	26
<i>Дмитрішин О.Я.</i> Розрахунок електричного поля в плівковій діелектричній системі як спосіб прогнозування електричної міцності високовольтного імпульсного конденсатора . . . . .	30
<i>Колиушко Г.М., Пличко А.В., Понуждаєва Е.Г.</i> Использование измерительного комплекса «КДЗ-1У» для оценки адекватности математической модели заземляющего устройства энергообъекта . . . . .	34
<i>Кравченко В.И., Яковенко И.В.</i> Влияние электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплектующих радиоизделий . . . . .	40
<i>Кравченко В.И., Яковенко И.В.</i> Возбуждение колебаний двумерного электронного слоя токами, наведенными внешним излучением . . . . .	44
<i>Немченко Ю.С., Лесной И.П.</i> Оборудование для проведения испытаний на молниестойкость по стандарту DO-160G (США) . . . . .	49
<i>Петков А.А.</i> Вероятностное определение числа поражений молнией наземных объектов стержневого типа . . . . .	56
<i>Хайнацкий С. А., Христо А.И., Шведов Л.П.</i> Электроразрядные методы очистки воды . . . . .	61
<i>Kniaziev V.V., Melnik S. I.</i> Assessment of probability of lightning direct strike into elements of stationary ground launch complex (англійською мовою) . . . . .	76

## CONTENTS

<b>Bakiko V.N., Grebin A.P., Shvaichenko V.B.</b> Calculation of the influence of AC mains impedance on the efficiency of interference filtering . . . . .	3
<b>Bakiko V.N., Popovych P.V., Shvaichenko V.B.</b> Estimation of noise immunity of the communication channel under the influence of random interference . . . . .	7
<b>Baranov M.I.</b> Calculation estimation of basic power descriptions of a storm cloud of troposphere of Earth . . . .	11
<b>Bohuslavskiy L.Z., Kozyrev S.S., Ovchynnikova L.E., Adamchuk Y.O., Chushchak S.V.</b> Conditions for ignition of the volume discharge in the systems of gas electrofiltration . . . . .	15
<b>Bondarenko A. Yu.</b> The plane inductor with two power sources for magnetic-pulse attraction of area metal sheet . . . . .	20
<b>Getman A.V., Rezinkin O.L.</b> Methodology of experimental determination of the spherical harmonics of the magnetic field of technical objects . . . . .	26
<b>Dmitrishin A.Ya.</b> Calculation of the electric field in a film dielectric system as a method for predicting the electrical strength of a high-voltage pulse capacitor . . . . .	30
<b>Koliushko G.M., Plichko A.V., Ponuzhdayeva H.G.</b> Measurement system "KDZ-1U" usage in estimating mathematical model's adequacy of power equipment's grounding connection . . . . .	34
<b>Kravchenko V., Yakovenko I.</b> Influence of Electromagnetic Radiation on Waveguide Characteristics of Semiconductor Component Radio Articles . . . . .	40
<b>Kravchenko V., Yakovenko I.</b> Excitation of Oscillations of Two-dimensional Electron Layer by Currents Induced by External Radiation . . . . .	44
<b>Nemchenko Y.S., Lesnoy I.P.</b> Equipment for test resistance for military stability under standard DO-160G (USA) . . . . .	49
<b>Petkov A.A.</b> Probabilistic determination of the number of lightning defeat in ground-based rod-type objects . . . .	56
<b>Khainatskyy S.A., Khrysto O.I., Shvedov L.P.</b> Electric discharge methods of water treatment . . . . .	61
<b>Kniaziev V.V., Melnik S.I.</b> Assessment of probability of lightning direct strike into elements of stationary ground launch complex . . . . .	76

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
СЕРІЯ: ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Збірник наукових праць

№ 14 (1290) 2018

Науковий редактор: Кравченко В.І., д-р техн. наук, професор  
Технічний редактор: Ваврів Л.В., канд. фіз.-мат наук, ст. наук. співр.  
Відповідальний за випуск: Обухова Г.Б., канд. техн. наук

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.  
НТУ «ХПІ». НДПКИ «Молнія».  
Тел. (057) 707-63-09. E-mail: l.v.vavriv@gmail.com

Обл.-вид № 20-18.

Підп. до друку 15.04.2018 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,95. Облік.-вид. арк. 9,10.  
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 № 5478 від 21.08.2017 р.  
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

---

Друкарня ВАТ «Цифра Прінт».  
Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 03.08.2009 р.  
Адреса: 61166, м. Харків, вул. Данилевського, 30

---