

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

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

Серія: Техніка та електрофізика високих напруг

№ 14 (1186) 2016

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2016

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 14 (1186). – 134 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

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

Координаційна рада:

Голова: Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

Секретар: К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц.;

А.П.Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є.І.Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;

Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;

Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;

А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;

В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;

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

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

В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;

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

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

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

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

М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

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

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

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

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

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

В. В. Князев, канд. техн. наук, ст. наук. співр.; О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.;

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

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

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 3 від 8 квітня 2016 р.

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

BULLETIN
OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
"KhPI"

Series: Technique and Electrophysics of High Voltage

№ 14 (1186) 2016

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkiv
NTU "KhPI", 2016

Bulletin of the National technical university "KhPI". Collected Works. Series: Techniques and Electrophysics of High Voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2016. – № 14 (1186). – 134 c.

State edition

Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy

KB № 5256 from July, 2, 2001

The collection is published on Ukrainian, Russian and English.

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

Coordinating Board:

L. L. Tovazhnyanskyy, Dr. Tech. Sci., Prof. (chief);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

G.M. Suchkov, Dr. Tech. Sci., Prof.; Yu.V. Timofeev, Dr. Tech. Sci., Prof.;

M.A. Tkachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.

Editorial Board:

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

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

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

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

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

V.V. Knyaziev, PhD. Tech. Sci., Senior Researcher; O.A. Serkov, Dr. Tech. Sci., Prof.;

Prof.; V.V. Rudakov, Dr. Tech. Sci., Prof.; L.V. Yakovenko, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof.

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

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

Protocol number 3 April, 08, 2016

УДК 620.179.14

М. Л. АНТОНОВ, В. Ф. БЕЗОТОСНИЙ, В. В. КОЗЛОВ, О. В. НАБОКОВА**ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНІТОПРУЖНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

У роботі показано, що тривалість перехідних процесів у магнітопружних перетворювачах може бути зменшена до значень, які не перевищують тривалості розповсюдження механічних напруг у об'єкті дослідження, і це може бути досягнуто правильним вибором кількості витків і частоти намагнічувального струму. Це дозволяє використовувати магнітопружні перетворювачі для контролю високочастотних динамічних процесів, а вибір раціональних параметрів МП дозволяє зменшити похибку вимірювань. Для збереження чутливості МП слід підвищувати частоту намагнічувального струму, а при розрахунках слід урахувати поверхневий ефект, що можливо використанням фіктивної магнітної проникності. Додатковими дослідженнями встановлено, що при проектуванні МП потрібне знання припустимої межі міцності матеріалу магнітопроводу, облік анізотропії матеріалу, початкової магнітної проникності та магнітострикції. Прикладом практичного використання наведених досліджень є розроблена система, яка вирішує завдання неруйнуючого експрес контролю феромагнітних матеріалів і конструкцій по визначенню механічних напруг, виникнення яких обумовлено дією експлуатаційних і технологічних факторів.

Ключові слова: магнітопружний перетворювач, перехідний процес, механічні напруги, постійна часу, динамічна характеристика.

Вступ. Магнітопружні перетворювачі (МП) у налазах зворотного зв'язку автоматизованих пристроїв є динамічною системою, що перетворює зусилля в електричний сигнал.

Постановка проблеми. В електричному колі намагнічування магнітопроводу міститься реактивний опір індуктивного характеру, що приводить до виникнення перехідних процесів при зміні факторів, що впливають на нього, у тому числі й при прикладенні до МП зусилля.

Метою даної роботи є аналіз конструкцій магнітопружних перетворювачів та розробка рекомендацій стосовно зменшення постійної часу перехідних процесів.

Динамічні процеси, що відбуваються в перетворювачі, доцільно розглядати відповідно до прийнятої авторами структурною схемою (механічна і електромагнітна ланки) [1].

Час протікання перехідних процесів при ударних східчастих навантаженнях у механічній ланці МП може бути оцінене за періодом власних коливань магнітопроводу [2]

$$T_m = \frac{h}{v_{зв}} = h \sqrt{\frac{\rho_{пл}}{E_p}}, \quad (1)$$

де h – висота магнітопроводу; $v_{зв}$ – швидкість звуку в магнітопроводі; $\rho_{пл}$ – щільність матеріалу магнітопроводу; E_p – модуль пружності в напрямку дії сили.

Тому що швидкість звуку у феромагнітних магнітопроводах датчиків становить близько 5000 м/с [3], то при висоті магнітопроводу (звичайно 5–10 см), застосовані методи класичної механіки. Час сприйняття магнітопроводом миттєвої зміни навантаження має порядок 10^{-5} – 10^{-4} секунди.

Як показано в [3], швидкість зміни намагніченості феромагнетику на кілька порядків вище швидкості розповсюдження механічних напруг, тобто реально не виявляє впливу на швидкодію розглянутих датчиків.

У електромагнітній ланці відбувається перетворення магнітного стану магнітопроводу МП в електричну величину $E_{вих}$ за допомогою вимірювальної обмотки. Намагнічувача та вимірювальна обмотки яв-

ляють собою опори активно-індуктивного характеру й істотно впливають на швидкодію МП. Перетворювач звичайно працює в режимі близькому до режиму холостого ходу. Тоді, враховуючи [4], запишемо вираз в операторній формі для передаточної функції за зусиллям

$$W_p(p) = \frac{E_{вих}(p)}{F(p)} = \frac{kU_n f_n}{1 + pT}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт формуючих факторів МП [5]; U_n – напруга намагнічувачої обмотки; f_n – частота намагнічувачого струму; T – постійна часу.

Тому що $T = \frac{L_n}{R_n}$, а $L_n = \frac{w_n^2}{R_m}$, то одержимо

$$T = \frac{w_n^2}{R_m} \cdot \frac{S_m}{l_m} \mu_\sigma, \quad (3)$$

де L_n й R_n – індуктивність і активний опір намагнічувачої обмотки; S_m – площа ретини магнітопроводу; l – довжина магнітопроводу вздовж середньої лінії; μ_σ – магнітна проникність матеріалу магнітопроводу при механічних напругах σ у них [6]

$$\mu_\sigma = \frac{\mu_n}{1 - \frac{1}{\pi} \mu_n \lambda_\sigma \sigma}, \quad (4)$$

де μ_n – початкова магнітна проникність матеріалу магнітопроводу; λ_σ – початкова магнітострикція.

Урахуємо, що

$$\mu_n = \frac{1}{1 + \frac{a_2}{a_1}} \cdot \mu_{n[100]}, \quad (5)$$

де a_1 – коефіцієнт лінійних розмірів; a_2 – коефіцієнт анізотропії; $\mu_{n[100]}$ – початкова магнітна проникність у напрямку кристалографічної осі легкого намагнічування [100].

Тоді запишемо

$$T = \frac{w_n^2}{R_m} \cdot \frac{S_m}{l_m} \cdot \frac{1}{1 + \frac{a_2}{a_1}} \cdot \frac{\mu_{n[100]}}{1 - \frac{1}{\pi} \mu_{n[100]} \lambda_\sigma \sigma}. \quad (6)$$

Як видно з даного виразу, для зменшення тривалості перехідного процесу, пов'язаного з індуктивністю намагнічувачої обмотки, слід зменшувати кіль-

кість витків w_n . Одночасно, для збереження чутливості МП, слід підвищувати частоту намагнічувачого струму, що відповідає реальному фізичному змісту.

При виборі раціональної частоти намагнічувачого струму, яка звичайно значно вище промислової, слід урахувати поверхневий ефект, що можливо шляхом використання фіктивної магнітної проникності [7]. Тоді одержимо

$$T = \frac{w_n^2}{R_m} \cdot \frac{S_m}{l_m} \cdot \frac{1}{1 + \frac{a_2}{a_1}} \cdot \frac{\sqrt{\mu_n}}{b\sqrt{2\pi f_n \gamma} - \frac{1}{\pi} \lambda_o \sigma_{\max} \sqrt{\mu_n}}, \quad (7)$$

де γ – електропровідність матеріалу магнітопроводу; b – товщина однієї пластини шихтованого магнітопроводу.

Комп'ютерний аналіз отриманого співвідношення для постійної часу МП показує, що шляхом правильного вибору кількості витків і частоти струму намагнічування, тривалість перехідних процесів у магнітопружних перетворювачах може бути зменшена до значень, що не перевищують тривалості розповсюдження механічних напруг у магнітопроводі. Таким чином, МП здатні контролювати динамічні процеси з частотами до 10 кГц і вище.

Розглянемо вплив підвищеної частоти намагнічувачого струму на вихідну напругу МП, магнітопружний гістерезис, лінійність вихідної характеристики, коливання вихідної напруги від девіації частоти. Аналіз виконаємо для Φ -подібного МП [8]. Цей перетворювач може бути використаний і в системах очування робототехнічних комплексів [9–12].

Значення ЕРС, що наводиться у вимірювальній обмотці МП пропорційна частоті намагнічувачого струму. Відхилення вихідної характеристики МП від теоретично лінійної пояснюється втратами в магнітопроводі й прийнятими раніше допущеннями. Для зменшення похибки вимірювань необхідно підтримувати постійною не тільки частоту, але й форму живлячої напруги.

Частота живлячої напруги значно впливає на значення ЕРС, що наводиться у вимірювальній обмотці МП. Залежність $E_{\text{вих}} = \varphi(f_n)$ при значеннях механічних напруг $\sigma = 1,2 \cdot 10^7$ Н/м² у елементі перетворювача, який деформується, приведена на рис. 1.

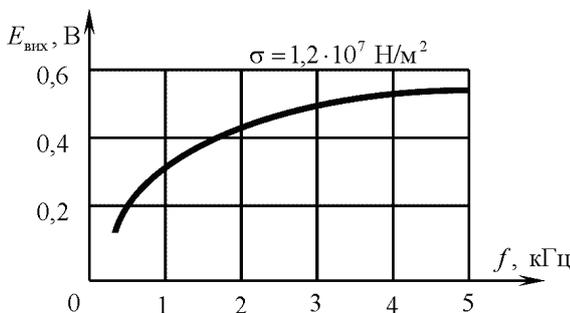


Рисунок 1 – Залежність вихідного сигналу МП від частоти при $\sigma = \text{const}$

Дослідження показали, що помітне збільшення вихідної напруги МП спостерігається при збільшенні частоти намагнічувачого струму порядку 2–3 кГц.

При подальшому збільшенні частоти зростання вихідної напруги відбувається менш інтенсивно. Слід зазначити, що девіація частоти $\Delta f_n = 1\%$ при частотах намагнічувачого струму 100 і 2000 Гц спричиняє до зміни вихідної напруги МП порядку 0,6 і 0,1% – відповідно. Підвищення частоти більш 3 кГц спричиняє також збільшення індуктивного опору обмоток.

Однією із задач, яку необхідно вирішувати для підвищення точності вимірювання зусиль МП, є задача зменшення магнітопружного гістерезису в матеріалі магнітопроводу. Найбільш ефективним методом зменшення втрат на гістерезис є підвищення частоти магнітного поля у феромагнітному матеріалі. Так при збільшенні частоти поля до 2 кГц спостерігалось систематичне зменшення магнітопружного гістерезису. Прийmemo площу петлі гістерезису при частоті 50 Гц за 100%. Відносні площі петлі гістерезису при підвищених частотах для електротехнічної сталі типу Е330 приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Залежність відносної площі петлі гістерезису від частоти

Частота, Гц	50	600	1200	2000
Площа петлі гістерезису, %	100	51	30	13

Як видно з приведеної таблиці, магнітопружний гістерезис може бути значно зменшений за рахунок підвищення частоти магнітного поля. Збільшення частоти вище 2–3 кГц менше впливає на зменшення площі петлі гістерезису.

Частота намагнічувачого струму, впливає на лінійність вихідної характеристики МП, причому дослідження показали, що підвищення лінійності для базової конструкції МП і її модифікацій відбувається при підвищенні частоти лише до 2–2,5 кГц.

На рис. 2 показані експериментальні залежності вихідного сигналу МП від значення механічних напруг у чутливому елементі перетворювача при різних частотах намагнічувачого струму.

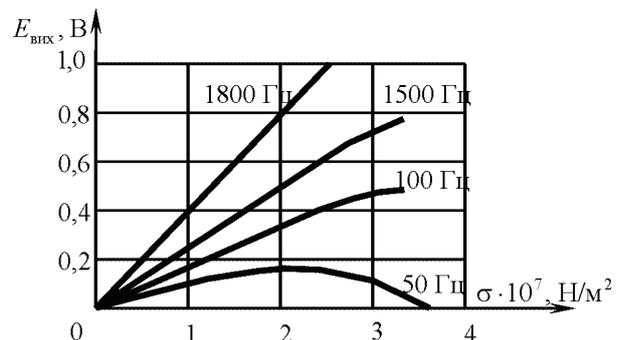


Рисунок 2 – Залежності вихідного сигналу МП від значення механічних напруг при різних частотах намагнічувачого струму

При випробуванні Φ -подібного перетворювача, магнітопровід якого був виготовлений електротехнічної сталі Е330 при товщині пластин 0,3 мм, була досягнута лінійність вихідної характеристики при $\sigma \leq 2 \cdot 10^7$ Н/м² порядку 0,1%. Частота намагнічувачого струму при цьому дорівнювала 1850 Гц.

Таким чином, підвищення частоти намагнічувального струму у МП є ефективним засобом підвищення лінійності їхніх вихідних характеристик.

Результати досліджень, які приведені в роботі [13], показали, що характер зміни магнітної проникності феромагнітних матеріалів при наявності в них механічних напруг, і як наслідок зміна вихідного сигналу МП, збігається з характером зміни амплітуди переважно першої гармоніки вихідного сигналу. Інакше кажучи, точність контролю зусиль магнітопружними перетворювачами залежить від гармонійного складу вихідного сигналу, і буде тем вище, чим менше амплітуда вищих гармонік. Ряд авторів, які рекомендують низькочастотне намагнічування магнітопроводів МП, застосовують спеціальні фільтри для придушення вищих гармонік. Однак такий підхід є складним і найчастіше малоефективним.

Для дослідження гармонійного складу вихідного сигналу Ф-подібного перетворювача був проведений експеримент, під час якого МП живився від джерела змінного струму із частотою від 50 до 4000 Гц і навантажувався зусиллями, які створювали в деформуемому датчику перетворювача механічні напруження до $4 \cdot 10^7$ Н/м². Сила намагнічувального струму дорівнювала 50 мА, що відповідає раціональній напруженості поля в матеріалі датчика перетворювача. Аналіз осцилограм дозволяє стверджувати, що застосування намагнічувального струму частотою менш 500 Гц при механічних напруженнях $\sigma < 2 \cdot 10^7$ Н/м² нераціонально через наявність у вихідному сигналі датчика вищих гармонік, що підвищує погрішність вимірювань.

Таким чином, область раціональних частот струму, що намагнічує, лежить у межах 500–2000 Гц. Конкретне значення частоти може бути обране виходячи з вимог, які пред'являються до точності вимірювань для конкретної модифікації МП на основі отриманих висновків.

Установлено, що раціональним значенням напруженості магнітного поля в матеріалі магнітопроводу МП, яке відповідає максимальній зміні магнітної проникності, є напруженість не більш 600–800 А/м (для електротехнічних сталей) [5]. Тому, для одержання максимальної магнітопружної чутливості МП необхідний вибір раціонального значення намагнічувального струму, відповідного до указаній напруженості поля.

Як відомо, значення магнітного потоку, яке створюється обмоткою, що намагнічує, дорівнює

$$\Phi = \frac{F_H}{R_M} = \frac{F_H \mu_\Phi S_M}{l_M} \quad (8)$$

З іншого боку

$$\Phi = H \mu_\Phi S_M \quad (9)$$

Враховуючи приведені співвідношення, запишемо вираз для раціонального значення намагнічувального струму

$$I_{\text{рац}} = \frac{H_{\text{рац}} l_M k}{w_H} \quad (10)$$

де $H_{\text{рац}}$ – раціональне значення напруженості магнітного поля; k – коефіцієнт анізотропії матеріалу магнітопроводу.

Значення магнітної індукції в пластинах, згідно [14]

$$B = \mu_a H_0 \frac{a}{b} \sqrt{\frac{\operatorname{ch} \frac{2b}{a} - \cos \frac{2b}{a}}{\operatorname{ch} \frac{2b}{a} + \cos \frac{2b}{a}}} \quad (11)$$

де a – теоретична глибина проникнення магнітного поля.

Остаточно дістанемо

$$I_{\text{рац}} = \frac{H_{\text{рац}} l_M k}{w_H b} \sqrt{\frac{1}{\pi f_H \mu_H \gamma}} \sqrt{\frac{\operatorname{ch} \frac{2b}{a} - \cos \frac{2b}{a}}{\operatorname{ch} \frac{2b}{a} + \cos \frac{2b}{a}}} \quad (12)$$

Після вибору раціональних параметрів (I_H , f_H , σ_{max}) похибка вимірювання зусиль не перевищує 0,15 %.

Як приклад практичного використання наведених досліджень є розроблена система, яка вирішує завдання неруйнуючого експрес контролю феромагнітних матеріалів і конструкцій по визначенню механічних напруг, виникнення яких обумовлено дією експлуатаційних і технологічних факторів. Для контролю механічних напруг у відповідальних вузлах і деталях складних систем, де кількість контрольованих точок десятки й сотні, а контроль повинен бути діагностичним і оперативним, необхідне використання спеціалізованих або універсальних ЕОМ. В основу побудови автоматичної системи контролю (АСК) механічних напруг в т-точках будь-якої конструкції РЕА або бортових конструкціях різних об'єктів, може бути покладена розроблена блок-схема. Функціональне призначення електронного комутатора (ЕК) і аналого-цифрового перетворювача (АЦП) не жадає пояснень. Кожний вихідний сигнал АЦП має цифровий код, який відповідає значенню параметра, що контролюється перетворювачем параметра. Сигнали з виходу АЦП надходять в арифметичний пристрій (АП), у якому відбувається порівняння з верхнім і нижнім припустимими значеннями кожного параметра. Інформація про припустимі межі зберігається в постійному запам'ятовувальному пристрої (ПЗП) комп'ютера. Пристрій керування (ПК) служить для забезпечення синхронності роботи ЕК, АЦП, АП й ПЗП. Результат порівняння надходить на вхід логічного пристрою (ЛП). Якщо значення параметра, який контролюється, перебуває в поле допуску, воно записується в гніздо оперативної пам'яті. При виході параметра, який контролюється, за межі поля допуску, сигнал з ЛП подається в пристрій керування, який конкретизує номер контрольної точки виміру й значення відхилення механічної напруги від припустимого. При необхідності інформація про параметр поза поля допуску з ЛП подається в підсистему діагностичного контролю (ПДК), яка встановлює причину відхилення.

Одними з основних елементів будь-якої автоматизованої системи контролю є чутливі елементи-перетворювачі, від чутливості й надійності яких у першу чергу залежить ефективність роботи АСК. Із широкого класу перетворювачів, які можуть бути використані в АСК, як показано вище, слід віддавати пере-

вагу МП, які відрізняються винятковою надійністю й потужним вихідним сигналом. Застосування МП пов'язане з безконтактним способом визначення механічних напруг у напружених елементах конструкцій, а це дозволяє розробляти АСК із більш широкими функціональними можливостями.

Використання різного виду компенсаційних схем для усунення первісного сигналу обмежує швидкість й можливість АСК, тому що необхідні додаткові регульовальні операції при переустановці АСК із об'єкта на об'єкт. З цієї точки зору більш ефективні МП, які виконані за мостовою схемою, що дозволяють відразу одержувати корисну інформацію без накладення первісного сигналу й з мінімальним впливом коливань навколишньої температури на опір обмоток і сполучних проводів. При відсутності механічних напруг в області контролю у вимірювальній обмотці електрорушійна сила (ЕРС) не наводиться. Механічні напруги, які виникають при впливі на матеріал зусиль, що порушують симетрію магнітного поля щодо вимірювального магнітопроводу й приводять до відгалуження частини потоку. Узгодження сигналу МП із блоком цифрового АЦП може здійснюватися як на змінному, так і на постійному струмі. Схеми узгодження на змінному струмі простіше, однак узгодження при цьому має ряд істотних недоліків у порівнянні з методом узгодження на постійному току. Фазове зрушення сигналу перетворювача щодо напруги викривлення вимагає установки у вихідні кола кожного перетворювача фазо зсувних пристроїв та індивідуального регулювання їх при кожній зміні точок контролю механічних напруг у конструкціях. До того ж ці пристрої призводять до додаткових похибок при зміні температури навколишнього середовища. Більшість промислових аналого-цифрових перетворювачів призначене для перетворення постійної аналогової напруги, тому між блоком ЕК і блоком АЦП є кільцевий демодулятор (рис. 3).

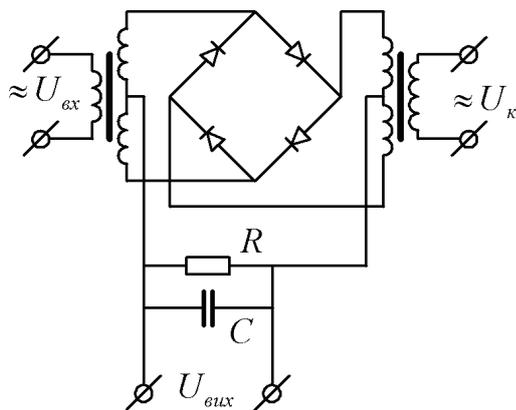


Рисунок 3 – Кільцевий демодулятор

Керуючий сигнал U_k перемикає діоди. При $U_k \gg U_{вх}$ вихідний сигнал лінійно залежить від напруги, що випрямлюється.

Висновки. Аналіз постійних часу МП різних конструкцій дозволяє здійснюючи розрахунки швид-

кодії й стабільності автоматизованих систем контролю й керування.

Додатковими дослідженнями встановлено, що при проектуванні МП потрібне знання припустимої межі міцності матеріалу магнітопроводу, облік анізотропії матеріалу, початкової магнітної проникності та магнітострикції. Для підвищення чутливості МП необхідний також вибір раціональних значень напруженості магнітного поля й частоти.

Розроблена система автоматичного контролю механічних напруг у деталях і вузлах наприклад бортових конструкцій може бути успішно використана для контролю статистичних і динамічних механічних напруг у діапазоні $(0...4) \cdot 10^7$ Н/м² при лінійній залежності вихідного сигналу перетворювача від їхнього значення.

Список літератури: 1. Чаплыгин В. И. Электромагнитный преобразователь усилий / В. И. Чаплыгин, В. Ф. Безотосный // Изв. вузов. Электромеханика. – 1977. – № 10. – С. 1159–1163. 2. Дорофеев А. Л. Электроиндуктивная (индукционная) дефектоскопия / А. Л. Дорофеев. – М.: Машиностроение, 1967. – 231 с. 3. Безотосный В. Ф. Учет энергетических факторов при расчете намагниченности ферромагнитных материалов / В. Ф. Безотосный, Э. В. Власенко // Электротехника и электроэнергетика. – 2004. – №1. – С. 13–17. 4. Безотосный В. Ф. К вопросу повышения точности расчета выходных характеристик базового многофункционального магнитоупругого датчика / В. Ф. Безотосный, В. В. Козлов, О. В. Набокова // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 48. – С. 56–59. 5. Безотосный В. Ф. Выбор рациональной частоты тока намагничивания токовихревых преобразователей при контроле материалов / В. Ф. Безотосный, В. В. Козлов, О. В. Набокова // Электротехника та електромеханіка. – 2012. – № 1 – С. 19–21. 6. Безотосный В. Ф. Дослідження інерційності електромагнітних процесів і розподілу вихрових струмів у ферромагнітних матеріалах / В. Ф. Безотосний, Е. В. Власенко, Г. М. Романіченко // Тиждень науки – 2013: щорічна наук.-практ. конф. викл., молодих вчених, аспірт., студ. ЗНТУ, Запоріжжя, 15–19 квітня 2013 р.: тези допов. – IV, 2013 – Т. 1 – С. 59. 7. Безотосный В. Ф. Система неразрушающего контроля неэлектрических параметров материалов электромагнитными методами / В. Ф. Безотосный, В. В. Козлов, О. В. Набокова // Вісник СевНТУ. Збірник наукових праць. Серія Механіка, енергетика, екологія. Випуск 127. – Севастополь, 2013. – С. 279–283. 8. Chaplygin V. I. A magnetoresilient transformer with a shunting magnetic circuit for stresses / V. I. Chaplygin, V. F. Bezotosny, P. A. Shamin // News of Higher educational institutions. Instrument making. – Т. XIX, № 7. – P. 55-58. 9. Onori M. A. Robot tactile sensing: a new array sensor / M. A. Onori, J. D. Mek Watson // Rob. sens. Vol. – 1986. – № 12. – P. 199-205. 10. Пат. 4584625 США, МКИ H010 7/00. Capacitive tactile sensor / Kellogg Nelson R. (США). – №649312; Заявл. 11.09.84; Оpub. 22.04.86; НКІ 21-302. 11. Nang Fuling An imaging tactile sensor magnetostriuctive transduction / Nang Fuling // Rob. sens. Vol. – 1987. – № 2. – P. 113-122. 12. Klinger D. Kraftsensor / D. Klinger // Roboter. – 1987. – № 6. – P. 62-64. 13. Казаков В. А. Оценка методом высших гармоник структурной повреждаемости стали при циклическом нагружении // Электромагнитные методы контроля качества материалов и изделий: Тезисы докладов 1-ой Всесоюзной межвузовской конференции. – Москва. 1972. – С. 40-43. 14. Ламмеранерр И. Вихревые токи / И. Ламмеранерр, М. Штафль. – М.: Энергия, 1977. – 210 с.

Bibliography (transliterated): 1. Chaplygin V. I. Elektromagnitnyy preobrazovatel' usilyi V. I. Chaplygin, V. F. Bezotosnyy Izv. vuzov. Elektromekhanika. 1977. № 10. 1159–1163 p. 2. Dorofeev A. L. Elektroinduktivnaya (induktsionnaya) defektoskopiya. – Moscow: Mashinostroenie, 1967. 231 p. 3. Bezotosnyy V. F. Uchet energeticheskikh faktorov pri raschete namagnichennosti ferromagnitnykh materialov. V. F. Bezotosnyy, E. V. Vlasenko. Elektrotehnika i elektroenergetika. 2004. No 1. pp. 13–17. 4. Bezotosnyy V. F. K voprosu povysheniya tochnosti rascheta vykhodnykh kharakteristik bazovogo mnogofunktional'nogo magnitoprugogo datchika. V. F. Bezotosnyy, V. V. Kozlov, O. V. Nabokova Vestnik NTU "KhPI". 2010. No 48. pp. 56–59. 5. Bezotosnyy V. F. Vybora ratsional'noy chastoty toka namagnichivaniya tokovikhrvykh preobrazovateley pri kontrole materialov. V. F. Bezotosnyy, V. V. Kozlov, O. V. Nabokova Elektrotehnika ta elektromekhanika. 2012. No 1. pp. 19–21. 6. Bezotosnyy V. F. Doslidzhennya inertsynosti elektromagnitnykh protsesiv i rozpodilu vikhrovikh strumiv u ferromagnitnykh materialakh V. F. Bezotosnyy, E. V. Vlasenko, G. M. Romanichenko. Tizhden' nauki. 2013: shchorichna nauk.–prakt. konf. vinkl., molodikh vchenikh, aspir., stud. ZNTU, Zaporizhzhya, 15–19 kvitnya 2013: tezi dopov. IV, 2013. Vol. 1. 59 p. 7. Bezotosnyy V. F. Sistema nerazrushayu-

shchego kontrolya neelektricheskikh parametrov materialov elektromagnitnymi metodami. V. F. Bezotosnyy, V. V. Kozlov, O. V. Nabokova. Visnik SevNTU. Zbimik naukovikh prats'. Seriya Mekhanika, energetika, ekologiya. Vipusk 127. Sevastopol', 2013. pp. 279–283. 8. Chaplygin V. I. A magneto resilient transformer with a shunting magnetic circuit for stresses. V. I. Chaplygin, V. F. Bezotosnyy, P. A. Shamin News of Higher educational institutions. Instrument making. Vol. XIX. No 7. pp. 55–58. 9. Onori M. A., Mek Watson J. D. Robot tactile sensing: a new array sensor Rob. sens. 1986. No 12. pp. 199–205. 10. Pat. 4584625 SShA, MKI N010 7/00. Capacitive tactile sensor Kellogg Nelson R. (SShA). № 649312; Zayavl. 11.09.84; Opub. 22.04.86; NKI 21-302. 11. Nang Fuling An imaging tactile sensor magnetostrictive transduction Rob. sens. 1987. No 2. pp. 113–122. 12. Klinger Dietmar. Kraftsensor. Poboter. 1987. No 6. pp. 62–64. 13. Kazakov V. A. Otsenka metodom vysshikh garmonik strukturnoy povrezhdaemosti stali pri tsiklicheskom narguzhenii Elektromagnitnye metody kontrolya kachestva materialov i izdeliy: Tezisy dokladov 1-oy Vsesoyuznoy mezhvuzovskoy konferentsii. Moscow. 1972. pp. 40–43. 14. Lammeraner I., Shtaf' M. Vikhrevye toki. Moscow: Energiya, 1977. 210 p.

Надійшла (received) 03.02.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Антонов Микола Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, декан Електротехнічного факультету; тел.: (061) 764–46–25; e-mail: dekanat_etf@zntu.edu.ua.

Antonov Mykola Leonidovych, Candidate of Technical Sciences, Docent, Zaporozhye National Technical University, the Dean of Electrical Engineering Faculty; tel.: (061) 764–46–25; e-mail: dekanat_etf@zntu.edu.ua.

Безотосний Володимир Федорович – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри Теоретичної та загальної електротехніки, тел.: (061) 769-83-94; e-mail: kafedra_tze@zntu.edu.ua.

Bezotosnyy Volodymyr Fedorovych – Candidate of Technical Sciences, Docent, Zaporozhye National Technical University, Associate Professor at the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; tel.: (061) 769-83-94; e-mail: kafedra_tze@zntu.edu.ua.

Козлов Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри Теоретичної та загальної електротехніки, тел.: (061) 764–46–25; e-mail: vvkozlov@zntu.edu.ua.

Kozlov Volodymyr Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences, Docent, Zaporozhye National Technical University, Associate Professor at the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; tel.: (061) 764–46–25; e-mail: vvkozlov@zntu.edu.ua.

Набокова Ольга Володимирівна – Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри Теоретичної та загальної електротехніки, тел.: (061) 769-83-94, ; e-mail: olga.nabokova777@gmail.com.

Nabokova Olga Volodymyrivna – Zaporozhye National Technical University, Associate Professor at the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; tel.: (061) 764–46–25; e-mail: olga.nabokova777@gmail.com.

УДК 621.3.022:537.311.8:316

М.И. БАРАНОВ

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИНДУКТИРОВАННОГО МОЩНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХОЙ НАНОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА ТОКА

Приведены результаты расчетной оценки электротермической стойкости проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами, поливинилхлоридной (ПВХ) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией первичных (вторичных) электрических цепей объектов электроэнергетики к воздействию на них аperiodического импульса тока временной формы 5/50 нс с амплитудой (1-100) кА, протекание которого вызвано внешней мощной электромагнитной помехой искусственного происхождения с заданными амплитудно-временными параметрами (АВП). Определены максимальные численные значения предельно допустимых и критических плотностей указанного помехового наносекундного импульса тока с принятыми АВП в рассматриваемых проводах (кабелях) без твердой изоляции, с ПВХ и ПЭТ изоляцией электрических цепей энергообъектов.

Ключевые слова: внешняя мощная электромагнитная помеха; провода и кабели электрических цепей объектов электроэнергетики; электротермическая стойкость кабельно-проводниковой продукции первичных и вторичных электрических цепей энергообъектов; предельно допустимые и критические плотности импульса тока аperiodической временной формы 5/50 нс в проводах и кабелях электроцепей энергообъектов.

Введение. Материалы статей израильского ученого Ph.D. V.I. Gurevich, недавно опубликованных в [1,2], указывают на то, что, несмотря на прошедшие десятилетия с начала во второй половине 20-го столетия активных научно-исследовательских работ в ведущих странах мира по проблеме защиты радиоэлектронного, электротехнического и электроэнергетического оборудования от действия на его электрические цепи мощного электромагнитного импульса (ЭМИ) ядерного взрыва (ЯВ), для большинства высокоразвитых стран мира обозначенная выше проблема так и осталась до конца не решенной. По смелому утверждению автора работ [1, 2] к настоящему времени «*ни в одной стране мира не были предприняты никакие практические меры для защиты национальных инфраструктур от ЭМИ ЯВ*». Выходит, что такая важная для современного общества инфраструктура и отрасль как промышленная электроэнергетика осталась не защищенной от поражающего действия на ее системы и устройства высокочастотного ЭМИ ЯВ. По мнению Ph.D. V.I. Gurevich многолетние действия ученых и специалистов в этом направлении были ограничены лишь материалами многочисленных докладов, отчетов и технических предложений. Не вдаваясь в причины такой сложившейся ситуации, а также в различные аспекты этой сложной научно-технической проблемы [1,2], отметим, что для специалистов из области техники и электрофизики высоких напряжений и больших импульсных токов здесь, на мой взгляд, применительно к защите объектов электроэнергетики от поражающего действия на них мощных электромагнитных помех (МЭМП) искусственного происхождения следует выделить два возможных для нас направления работ:

- защита от внешнего воздействия ЭМИ ЯВ микроэлектронной техники, установленной в устройствах и системах электроэнергетических объектов (ЭЭО);

- защита от внешнего воздействия ЭМИ ЯВ кабельно-проводниковой продукции, установленной в первичных и вторичных электрических цепях ЭЭО.

Постараемся в дальнейшем в меру своих научно-технических возможностей рассмотреть только отдельные вопросы возможной защиты от ЭМИ ЯВ электрических проводов и кабелей, используемых как в первичных, так и вторичных цепях рассматриваемых ЭЭО.

1. Постановка задачи исследования электротермической стойкости проводов (кабелей) ЭЭО к импульсу тока 5/50 нс. В рамках данного исследования рассмотрим провода и кабели электрических цепей ЭЭО, по круглым сплошным (расщепленным) медным (алюминиевым) жилам ($i = 1$) и оболочкам (экранам, $i = 2$) которых в продольном направлении протекает импульс тока $i_L(t)$, описываемый аperiodической временной формой $\tau_f/\tau_p = 5/50$ нс с амплитудой $I_{mL} = (1-100)$ кА. Отметим, что в этом случае временные параметры τ_f и τ_p соответствуют длительности фронта на уровне $(0,1-0,9) \cdot I_{mL}$ и импульса на уровне $0,5 \cdot I_{mL}$ указанного тока. Принятая временная форма наносекундного импульса тока $i_L(t)$ соответствует требованиям, приведенным в [1-3] для действия МЭМП на ЭЭО. Примем, что исследуемые провода и кабели ЭЭО, находящиеся как в режиме длительно допустимой токовой загрузки, так и без нее (в режиме обесточивания), размещены в воздушной среде с температурой $\theta_0 = 20$ °С. Используем условие адиабатического характера протекающих в материалах жил (оболочек) проводов (кабелей) электротепловых процессов, при котором влиянием теплоотдачи с поверхностей их токонесущих частей, имеющих текущую температуру $\theta_i \geq \theta_0$, и теплопроводности их проводящих материалов и изоляции на джоулев нагрев токонесущих частей жил (экранов) пренебрегаем. Расчетная оценка минимальной глубины проникновения Δ_i в медную (алюминиевую) жилу (оболочку) провода (кабеля) используемого токового импульса ($t_m \approx 1,6$ нс $\tau_f \approx 8$ нс) показывает, что в стационарном режиме значение ее величины $\Delta_i \approx 2[t_m/(\pi\mu_i\gamma_i)]^{1/2}$ [4], где t_m – время, соответствующее амплитуде тока I_{mL} , $\mu_i = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, а γ_i – удельная электропроводность меди (алюминия) жилы (экрана) при

$\theta_0 = 20$ °С, составляет для области высоких частот в спектре импульса тока в медь примерно 1,2 мкм, а в алюминий – 1,5 мкм. С учетом того, что основное тепловыделение в материалах жил (экранов) исследуемых проводов (кабелей) происходит на спаде рассматриваемого импульса тока (при $t \geq 100 \cdot t_m$ для области низких частот в спектре импульса тока), то максимальная глубина проникновения Δ_i магнитного поля по приведенной выше формуле для меди будет составлять не менее 12 мкм, а для алюминия – 15 мкм.

Несмотря на приведенные выше численные оценки глубин проникновения Δ_i магнитного поля исследуемого апериодического наносекундного импульса тока в токонесущие части провода (кабеля), в первом (грубом) приближении на основании того, что при полной длительности воздействия на них принятого токового импульса (внутреннего источника тепла) $t_0 \approx 10\tau_p \approx 500$ нс в рассматриваемых токопроводящих материалах кабельно-проводниковой продукции (КПП) длина радиальной тепловой волны будет составлять примерно $\lambda_T \approx 0,05$ мм [4] полагаем, что диссипация (рассеяние) джоулева тепла в медных (алюминиевых) жилах и оболочках КПП будет происходить практически по их всему поперечному сечению. Считаем, что электротермическая стойкость проводов (кабелей) электрических цепей ЭЭО при воздействии на них указанного импульса тока лимитируется их предельно допустимой кратковременной температурой нагрева θ_{ik} , зависящей от степени снижения механической прочности материала жилы (оболочки) и тепловых условий работы изоляции проводов (кабелей) в режиме ее кратковременного нагрева наносекундным импульсом тока, протекающим по их токонесущим частям. Принимаем, что в первом приближении значение температуры θ_{ik} соответствует предельно допустимой кратковременной температуре нагрева θ_{ikd} проводов и кабелей токами короткого замыкания промышленной частоты 50 Гц, приведенной в [5,6]. Поэтому для изолированных проводов (кабелей) с медными и алюминиевыми жилами (экранами) и ПВХ изоляцией можно считать, что $\theta_{ik} \approx 150$ °С, а для проводов и кабелей с ПЭТ изоляцией – $\theta_{ik} \approx 120$ °С [5,6]. Для неизолированных (оголенных) проводов согласно [5,6] при тяжениях в их токонесущих частях не более 10 Н/мм² для медной жилы $\theta_{ik} \approx 300$ °С, а для алюминиевой жилы – $\theta_{ik} \approx 200$ °С. Требуется выполнить приближенную расчетную оценку электротермической стойкости исследуемой КПП к воздействию наносекундного импульса тока апериодической временной формы $\tau_f/\tau_p = 5/50$ нс, а также определить предельно допустимые S_{id} и критические S_{ik} поперечные сечения жил (экранов) рассматриваемых проводов (кабелей) и максимальные значения предельно допустимых δ_{mid} и критических δ_{mik} плотности импульсного тока от МЭМП в токонесущих частях рассматриваемой КПП как без изоляции (случай оголенных проводов), так и с ПЭТ и ПВХ изоляцией. Для большей ясности отметим, что при этом сечения S_{id} и плотности тока δ_{mid} будут соответствовать указанным предельно допустимым кратковременным температурам нагрева θ_{ik} исследуемых

проводов (кабелей), а сечения S_{ik} и плотности тока δ_{mik} – явлению электрического взрыва (ЭВ) материала их токонесущих частей и выходу из строя соответствующих электрических цепей ЭЭО.

2. Расчетная оценка электротермической стойкости проводов (кабелей) ЭЭО к воздействию импульса тока 5/50 нс. Воспользуемся известным критериальным соотношением, определяющим электротермическую стойкость рассматриваемых неизолированных проводов и изолированных проводов (кабелей) ЭЭО к действию на их медные или алюминиевые жилы (экраны) нормированного по [1-3] апериодического импульса тока 5/50 нс и имеющим следующий вид [5]:

$$\theta_i \leq \theta_{ik}. \quad (1)$$

Для оценки в (1) текущей температуры нагрева θ_i материалов жил (экранов) проводов и кабелей поперечным сечением S_i электрических цепей ЭЭО, с учетом нелинейного характера изменения по [7] из-за нагрева их удельной электропроводности $\gamma_i = \gamma_{0i} [1 + c_{0i} \beta_{0i} (\theta_i - \theta_0)]^{-1}$, в случае протекания по ним исследуемого апериодического импульса тока и соответственно определения по (1) их стойкости при известных нам исходных величинах θ_{ik} воспользуемся следующим соотношением [5]:

$$\theta_i \approx \theta_{0i} + (c_{0i} \beta_{0i})^{-1} \left\{ \exp[J_L \beta_{0i} / (\gamma_{0i} S_i^2)] - 1 \right\}, \quad (2)$$

где γ_{0i} , c_{0i} , β_{0i} – соответственно удельная электропроводность, удельная теплоемкость, отнесенная к единице объема материалов жил (оболочек) проводов (кабелей), и тепловой коэффициент удельной электропроводности материалов токонесущих частей КПП до воздействия на них наносекундного импульса тока

при температуре воздушной среды θ_0 ; $J_L = \int_0^{\tau_p} i_L^2(t) dt$ –

интеграл действия апериодического импульса тока $\tau_f/\tau_p = 5/50$ нс, протекающего в аварийном режиме (при воздействии ЭМИ ЯВ на инженерные коммуникации воздушных и подземных линий электропередачи) по жилам (оболочкам) исследуемых проводов и кабелей; $\theta_{0i} = \theta_0$ или $\theta_{0i} = \theta_{id}$.

Из (2) следует, что при заданных значениях S_i , θ_0 и неизменных величинах γ_{0i} , c_{0i} и β_{0i} нахождение по (2) температуры нагрева θ_i жилы (оболочки) провода или кабеля протекающим помеховым наносекундным током $i_L(t)$ будет сводиться к определению интеграла действия J_L данного токового импульса. Расчетную оценку интеграла действия J_L воздействующего на токонесущие части провода (кабеля) апериодического импульса тока $\tau_f/\tau_p = 5/50$ нс предлагается осуществлять по следующему приближенному аналитическому выражению [5]:

$$J_L \approx k_L^2 I_{mL}^2 [0,14t_m + 0,66\tau_p + t_m\tau_p(1,52t_m + 7,4\tau_p)^{-1}], \quad (3)$$

где

$$k_L \approx \left[(0,21 \cdot t_m \tau_p^{-1})^{\frac{0,76t_m}{(3,7\tau_p - 0,76t_m)}} - (0,21 \cdot t_m \tau_p^{-1})^{\frac{3,7\tau_p}{(3,7\tau_p - 0,76t_m)}} \right]^{-1}$$

– нормирующий коэффициент для помехового импульса

тока 5/50 нс, обусловленного воздействием на электрические цепи ЭЭО мощного ЭМИ высотного ЯВ.

В табл. 1 приведены численные значения теплофизических параметров γ_{0i} , c_{0i} и β_{0i} при $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ для меди и алюминия, широко применяемых в проводах (кабелях) первичных и вторичных электрических цепей ЭЭО [5].

Таблица 1 – Теплофизические характеристики основных проводящих материалов жил (оболочек) проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО при $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ [4,7]

Материал жилы (оболочки) КПП	γ_{0i} , $10^7 \cdot (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$	c_{0i} , $10^6 \cdot \text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	β_{0i} , $10^{-9} \cdot \text{м}^3/\text{Дж}$
Медь	5,81	3,92	1,31
Алюминий	3,61	2,70	2,14

3. Расчетная оценка предельно допустимых и критических сечений жил (оболочек) проводов (кабелей) ЭЭО для импульса тока 5/50 нс. Для предельно допустимых поперечных сечений S_{id} токонесущих жил (оболочек) рассматриваемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО с учетом критерия соотношения (1) для их электротермической стойкости к действию импульса тока 5/50 нс от МЭМП имеем [5]:

$$S_{id} \approx \sqrt{J_L} / C_{id}, \quad (4)$$

где $C_{id} = (J_{ikd} - J_{id})^{1/2}$; J_{ikd} и J_{id} – соответственно интегралы импульса тока 5/50 нс согласно [7] для токонесущих жил (экранов) проводов и кабелей ЭЭО, предельные кратковременные и длительно допустимые температуры нагрева материала которых соответствуют известным величинам θ_{ik} и θ_{id} .

Численные значения для температуры θ_{ik} нами были приведены ранее в разд. 1. Что касается температуры θ_{id} , то укажем, что для изолированных проводов (кабелей) исследуемых электрических цепей ЭЭО с ПЭТ и ПВХ изоляцией величина θ_{id} численно составляет 65°C , а для неизолированных (оголенных) проводов – 70°C [6]. Для полноты информации заметим, что в режиме обесточивания проводов (кабелей) их текущая температура в принятом нами приближении составляет $\theta_i = \theta_0$, а в номинальном режиме их токовой загрузки – $\theta_i = \theta_{id}$. Поэтому при расчетной оценке в (4) интегралов импульса тока 5/50 нс J_{ikd} и J_{id} можно воспользоваться следующими приближенными соотношениями [5]:

$$J_{ikd} \approx \gamma_{0i} \cdot \beta_{0i}^{-1} \ln[c_{0i} \beta_{0i} (\theta_{ik} - \theta_0) + 1]; \quad (5)$$

$$J_{id} \approx \gamma_{0i} \cdot \beta_{0i}^{-1} \ln[c_{0i} \beta_{0i} (\theta_{id} - \theta_0) + 1]. \quad (6)$$

Для критических поперечных сечений S_{ik} токонесущих жил (оболочек) рассматриваемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО при действии на них импульса тока 5/50 нс с учетом известного из [7] условия ЭВ металлического токопровода находим [5]:

$$S_{ik} \approx \sqrt{J_L} / D_{ik}, \quad (7)$$

где $D_{ik} = (J_{ik} - J_{id})^{1/2}$; J_{ik} – критическое значение интеграла импульса тока 5/50 нс для токонесущих жил (оболочек) проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО, при котором наступает их ЭВ и выход из строя.

Пользователю следует помнить, что при отсутствии в исследуемых проводах (кабелях) первичных (вторичных) электрических цепей ЭЭО предварительной токовой загрузки до воздействия на них ЭМИ ЯВ и соответственно рассматриваемого импульса тока 5/50 нс из (6) при $\theta_i = \theta_0$ вытекает, что интеграл тока $J_{id} = 0$. Из (4) и (7) видно, что численные значения поперечных сечений S_{id} и S_{ik} для медных (алюминиевых) жил (оболочек) проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО, испытывающих поражающее воздействие мощного ЭМИ ЯВ и обусловленное им протекание по их токоведущим частям наносекундного импульса тока аperiodической временной формы $\tau_f/\tau_p = 5/50$ нс, будут зависеть практически только от численного значения интеграла действия J_L этого токового импульса. В свою очередь, согласно (3) данное значение интеграла действия J_L при заданных нами временных параметрах τ_f , t_m и τ_p (соответственно 5, 8 и 50 нс) будет определяться лишь амплитудой I_{mL} протекающего наносекундного импульса тока. Согласно [3] нормированный уровень электрического напряжения U_H наводки в первичных (вторичных) электрических цепях ЭЭО при воздействии на них с окружающей воздушной атмосферы МЭМП, вызванной мощным ЭМИ высотного ЯВ, составляет 2,5 кВ. Какие амплитудные значения I_{mL} тока аperiodической временной формы 5/50 нс могут вызвать такие перенапряжения в первичных (вторичных) цепях ЭЭО? Безусловно, эти уровни в каждом конкретном случае будут определяться значениями электрических сопротивлений соответствующих участков данных электрических цепей. Учитывая аperiodический характер рассматриваемой электрической наводки в цепях ЭЭО и низкоомный характер электрической нагрузки (доли Ом), содержащей высокопроводные жилы и оболочки КПП, можно говорить о том, что уровни импульсного тока наводки могут изменяться в широком пределе. Поэтому для количественных оценок по (3) значений интеграла действия J_L помехового наносекундного импульса тока 5/50 нс диапазон изменений его амплитуды I_{mL} в проводах (кабелях) цепей ЭЭО может составлять от 1 до 100 кА.

В табл. 2 приведены численные значения интегралов импульса тока 5/50 нс, найденные при $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ по (5), (6) и экспериментальным путем при ЭВ в воздушной среде коротких металлических проволочек [7,8].

Таблица 2 – Численные значения интегралов импульса тока 5/50 нс J_{ikd} , J_{id} и J_{ik} для исследуемых проводов (кабелей) электрических цепей ЭЭО при $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ [7,8]

Вид изоляции провода (кабеля) в цепях ЭЭО	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля) в цепях ЭЭО	Значения интегралов импульса тока 5/50 нс в цепях ЭЭО, $10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$		
		J_{ikd}	J_{id}	J_{ik}
ПВХ	Медь	0,227	0,092	1,950
	Алюминий	0,095	0,039	1,090
ПЭТ	Медь	0,183	0,092	1,950
	Алюминий	0,077	0,039	1,090
Провод без изоляции	Медь	0,395	0,101	1,950
	Алюминий	0,120	0,043	1,090

4. Расчетная оценка предельно допустимых и критических плотностей импульса тока 5/50 нс для жил (оболочек) проводов (кабелей) ЭЭО. Для мак-

симальных значений предельно допустимых плотностей δ_{mid} помехового импульса тока 5/50 нс в токонесущих жилах (оболочках) рассматриваемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО из (4)-(6) с учетом принятых допущений в первом приближении находим [5]:

$$\delta_{mid} \approx I_{mL} / S_{id} \approx I_{mL} C_{id} / \sqrt{J_L} . \quad (8)$$

Для максимальных значений критических плотностей δ_{mik} помехового импульса тока 5/50 нс в токоведущих частях рассматриваемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО из (6) и (7) при принятых допущениях в первом приближении получаем [5]:

$$\delta_{mik} \approx I_{mL} / S_{ik} \approx I_{mL} D_{ik} / \sqrt{J_L} . \quad (9)$$

Учитывая, что $(J_L)^{1/2} \sim I_{mL}$, из (8) и (9) следует, что в принятой нами приближении искомые значения предельно допустимых δ_{mid} и критических δ_{mik} плотностей импульса тока $\tau_p/\tau_m = 5/50$ нс, вызванного воздействием на системы ЭЭО мощного ЭМИ ЯВ, в исследуемых проводах и кабелях первичных (вторичных) электрических цепей ЭЭО не будут зависеть от амплитуды I_{mL} тока.

5. Результаты численной реализации предложенного подхода по оценке электротермической стойкости проводов (кабелей) ЭЭО к воздействию импульса тока 5/50 нс. Используя представленные выше приближенные расчетные соотношения, выполним расчетную оценку предельно допустимых поперечных сечений S_{id} , критических поперечных сечений S_{ik} , предельно допустимых плотностей δ_{mid} тока, критических плотностей δ_{mik} тока, а также температуры нагрева θ_i медных (алюминиевых) жил (оболочек) проводов и кабелей с ПВХ и ПЭТ изоляцией поперечным сечением $S_i = S_{id}$ электрических цепей ЭЭО, испытывающих при $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ в нормальном рабочем режиме ($\theta_{id} = 65^\circ\text{C}$) воздействие помехового наносекундного импульса тока аperiodической временной формы 5/50 нс ($t_m = 8$ нс; $\tau_p = 50$ нс; $k_L = 1,16$) с амплитудой $I_{mL} = 25$ кА. Из (3)-(6) при принятых исходных данных для АВП помехового наносекундного импульса тока $i_L(t)$ с учетом материалов табл. 1 и 2 находим, что для медных жил (экранов) указанных проводов и кабелей с ПВХ изоляцией предельно допустимое поперечное сечение S_{id} составляет примерно $4,7 \cdot 10^{-2}$ мм², а с ПЭТ изоляцией – $5,7 \cdot 10^{-2}$ мм². Для алюминиевых жил (оболочек) этих проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией численное значение S_{id} оказывается равным около $7,3 \cdot 10^{-2}$ мм², а с ПЭТ изоляцией – $8,8 \cdot 10^{-2}$ мм². Согласно (2) данным поперечным сечениям S_{id} будут соответствовать наибольшие температуры нагрева θ_i исследуемых медных и алюминиевых жил (экранов) КПП с ПВХ и ПЭТ изоляцией, приближенно составляющие 133 и 109 °С. Так как эти температуры не превышают соответствующих предельно допустимых кратковременных температур нагрева θ_{ik} для проводов и кабелей с ПВХ (150 °С) и ПЭТ (120 °С) изоляцией, то согласно (1) можно говорить о том, что данная КПП цепей ЭЭО удовлетворяет требованиям электротермической стойкости к воздействию на нее указанного помехового аperiodического импульса тока 5/50

нс амплитудой $I_{mL} = 25$ кА. Далее из (7) с учетом (3), (6) и данных табл. 1 и 2 определяем, что в рассматриваемом случае ($t_m = 8$ нс; $\tau_p = 50$ нс; $k_L = 1,16$; $I_{mL} = 25$ кА; $J_L = 29,6$ А²·с) критическое поперечное сечение S_{ik} для медных токонесущих частей проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО с ПВХ и ПЭТ изоляцией будет составлять примерно $1,3 \cdot 10^{-2}$ мм², а для алюминиевых – $1,7 \cdot 10^{-2}$ мм².

Что касается неизолированных (оголенных) медных и алюминиевых токонесущих частей КПП электрических схем ЭЭО, то для них при их предварительной токовой загрузке ($\theta_{id} = 70^\circ\text{C}$) в рассматриваемом нештатном режиме работы, связанном с дополнительным воздействием на них помехового импульса тока 5/50 нс, в соответствии с (4)-(6) и данными табл. 1 и 2 предельно допустимые поперечные сечения S_{id} окажутся соответственно примерно равными $3,2 \cdot 10^{-2}$ мм² и $6,2 \cdot 10^{-2}$ мм². Следует обратить внимание инженеров-электронщиков на тот любопытный радиотехнический факт, что последние указанные численные значения параметра S_{id} по порядку величины соответствуют поперечным сечениям луженых медных токовых «дорожек» на большинстве электронных плат микропроцессорной техники. Критические поперечные сечения S_{ik} для оголенных медных и алюминиевых токопроводов цепей ЭЭО согласно (6), (7) и данных табл. 1 и 2 в этом случае (для заданного помехового импульса тока 5/50 нс) будут примерно равными $1,25 \cdot 10^{-2}$ и $1,65 \cdot 10^{-2}$ мм². Отсюда вытекает повышенная актуальность вопросов оценки и обеспечения электротермической стойкости к индуцированному внешней МЭМП искусственного происхождения (например, ЭМИ высотного ЯВ) наносекундному импульсу тока $i_L(t)$ особенно для слаботочной КПП вторичных электрических цепей ЭЭО и тонких токопроводящих структур электронных плат микроэлектронной техники, широко используемой в устройствах ЭЭО.

В табл. 3 с использованием (3)-(9), данных табл. 1 и 2 приведены приближенные численные значения предельно допустимых δ_{mid} и критических δ_{mik} плотностей помехового наносекундного импульса тока 5/50 нс в медных и алюминиевых жилах (оболочках) КПП первичных и вторичных электрических цепей ЭЭО.

Таблица 3 – Численные значения предельно допустимых δ_{mid} и критических δ_{mik} плотностей импульса тока 5/50 нс в медных и алюминиевых жилах (экранах) КПП первичных и вторичных электрических цепей ЭЭО

Вид изоляции провода (кабеля) в цепях ЭЭО	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля) в цепях ЭЭО	Значения плотностей δ_{mid} и δ_{mik} для импульса тока 5/50 нс в цепях ЭЭО, кА/мм ²	
		δ_{mid}	δ_{mik}
ПВХ	Медь	532	1923
	Алюминий	342	1470
ПЭТ	Медь	438	1923
	Алюминий	284	1470
Провод без изоляции	Медь	781	2000
	Алюминий	403	1515

Сравнение приведенных в табл. 3 численных результатов для предельно допустимых δ_{mid} и критиче-

ских δ_{mik} плотностей наносекундного импульса тока 5/50 нс в медных и алюминиевых токоведущих частях указанной КПП электрических цепей ЭЭО с известными по [9] значениями плотностей тока δ_{mid} и δ_{mik} применительно к протеканию в них наносекундного токового импульса 10/350 мкс от короткого грозового разряда в наружные (внутренние) элементы и устройства ЭЭО [10] показывает, что численные значения плотностей δ_{mid} и δ_{mik} для исследуемого наносекундного импульса тока соответственно примерно в 60 и 90 раз превышают соответствующие значения рассматриваемых токовых плотностей для указанного наносекундного импульса тока.

Выводы. 1. Впервые расчетным путем установлено, что для медных жил (оболочек) электрических проводов (кабелей) ЭЭО с ПВХ и ПЭТ изоляцией предельно допустимые плотности δ_{mid} помехового импульса тока 5/50 нс, индуцированного в цепях ЭЭО внешней МЭМП искусственного происхождения, численно составляют примерно 532 и 438 кА/мм², а для алюминиевых жил (оболочек) электрических проводов (кабелей) с ПВХ и ПЭТ изоляцией – соответственно 342 и 284 кА/мм². Для неизолированных (оголенных) медных и алюминиевых токонесущих частей КПП предельно допустимые плотности δ_{mid} указанного наносекундного импульса тока составляют около 781 и 403 кА/мм².

2. Расчетные оценки критических плотностей δ_{mik} помехового импульса тока 5/50 нс в медных жилах (оболочках) электрических проводов (кабелей) цепей ЭЭО с ПВХ и ПЭТ изоляцией указывают на то, что в первом приближении они численно составляют около 1923 кА/мм², а в алюминиевых жилах (оболочках) электрических проводов (кабелей) с ПВХ и ПЭТ изоляцией – примерно 1470 кА/мм². Для неизолированных (оголенных) медных и алюминиевых токонесущих частей КПП в условиях воздействия на них внешних МЭМП искусственного происхождения критические плотности δ_{mik} исследуемого наносекундного импульса тока составляют примерно 2000 и 1515 кА/мм².

3. Предложенный инженерный подход для расчетной оценки электротермической стойкости КПП первичных (вторичных) электрических цепей ЭЭО и полученные приближенные численные значения для предельно допустимых δ_{mid} и критических δ_{mik} плотностей помехового импульса тока 5/50 нс амплитудой $I_{mL} = (1-100)$ кА могут быть использованы при выборе КПП для первичных и вторичных электрических цепей ЭЭО, отвечающих действующим жестким требованиям по помехоустойчивости их систем к поражающему воздействию на них внешних МЭМП искусственного происхождения, включая и мощный ЭМИ высотного ЯВ. Установленные в первом приближении количественные значения величин плотностей δ_{mid} и δ_{mik} рассматриваемого помехового наносекундного аperiodического импульса тока 5/50 нс могут найти также свое практическое применение и при проектировании (конструировании) стойких к воздействию внешних МЭМП токопроводящих «дорожек» электронных плат микропроцессорной техники, устанавливаемой во многих системах и устройствах объектов промышленной электроэнергетики.

кундного аperiodического импульса тока 5/50 нс могут найти также свое практическое применение и при проектировании (конструировании) стойких к воздействию внешних МЭМП токопроводящих «дорожек» электронных плат микропроцессорной техники, устанавливаемой во многих системах и устройствах объектов промышленной электроэнергетики.

Список литературы: 1. Gurevich V.I. Military and political aspects of one of the problems of the modern power industry / V.I. Gurevich // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – №5. – С. 69–74. 2. Gurevich V.I. Problems in testing digital protective relay for immunity to intentional destructive electromagnetic impacts. Continuation of the theme / V.I. Gurevich // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – №6. – С. 66–69. 3. Сухоруков С.А. Помехозащитные устройства ЗАО «ЭМСОТЕХ» / С.А. Сухоруков. – Калуга: ЭМСОТЕХ, 2014. – 72 с. 4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач / М.И. Баранов. – Х.: Точка, 2010. – 407 с. 5. Баранов М.И. Электротермическая стойкость проводов и кабелей летательного аппарата к поражающему действию импульсного тока молнии / М.И. Баранов, В.И. Кравченко // *Электричество*. – 2013. – № 10. – С. 7–13. 6. *Электротехнический справочник: Производство и распределение электрической энергии*. Том 3, Кн. 1 / Под ред. И.Н. Орлова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с. 7. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972. – 391 с. 8. Баранов М.И. Электротермическая стойкость проводов и кабелей электроэнергетических объектов к поражающему действию большого импульсного тока молнии / М.И. Баранов, С.В. Рудаков // *Электричество*. – 2016. – № 3. – С. 12–22. 9. Баранов М.И. Применение мощного высоковольтного генератора ГИТМ-10/350 мкс для оценки электротермической молниестойкости проводов и кабелей электрических цепей объектов промышленной электроэнергетики / М.И. Баранов, С.В. Рудаков // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 7–12. 10. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. – Part 1: General principles». – Geneva, Publ. IEC, 2010.

Bibliography (transliterated): 1. Gurevich V.I. Military and political aspects of one of the problems of the modern power industry. *Elektrotehnika i elektromehaniika*. 2015. № 5. pp. 69–74. 2. Gurevich V.I. Problems in testing digital protective relay for immunity to intentional destructive electromagnetic impacts. Continuation of the theme. *Elektrotehnika i elektromehaniika*. 2015. № 6. pp. 66–69. 3. Suhorukov S.A. Pomehozashchitnye ustrojstva ZAO «EMCOTEX». Kaluga: EMCOTEX, 2014. 72 p. 4. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki. Vol. 2, Kniga. 2: Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach. Kharkiv: Tochka, 2010. 407 s. 5. Baranov M.I., Kravchenko V.I. Elektrottermicheskaja stojkost' provodov i kabelej letatel'nogo apparata k porazhushhemu dejstvuju impul'snogo toka molnii. *Elektrichestvo*. 2013. № 10. pp. 7–13. 6. *Elektrotehnicheskij spravocchnik: Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoj energii*. Vol. 3, Kniga 1. Pod red. I.N. Orlova. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 880 p. 7. Knopfel' H. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja. Moscow: Mir. 1972. 391 p. 8. Baranov M.I., Rudakov S.V. Elektrottermicheskaja stojkost' provodov i kabelej elektroenergeticheskikh ob'ektov k porazhushchemu dejstvuju bol'shogo impul'snogo toka molnii. *Elektrichestvo*. 2016. № 3. pp. 12–22. 9. Baranov M.I., Rudakov S.V. Primenenie moshchnogo vysokovol'nogo generatora GITM-10/350 μ s dlja otsenki elektrottermicheskogo molniestojkosti provodov i kabelej elektricheskikh tsepej ob'ektov promyshlennoj elektroenergetiki. *Visnik NTU «HPI»*. Zbirnik naukovih prac'. Serija: "Tehnika ta elektrofizika visokih naprug". Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. № 51 (1160). pp. 7–12. 10. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva: Publ. IEC, 2010.

Поступила (received) 23.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Баранов Михаил Иванович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» НТУ «ХПИ», г. Харьков; тел.: (057) 707-68-41; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

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

УДК 621.314.5:537.523:661.666.4

Л. З. БОГУСЛАВСЬКИЙ, Д. В. ВІННИЧЕНКО, Н. С. НАЗАРОВА, Ю. О. АДАМЧУК, С. В. ЧУЩАК

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОВОЛЬТНОЇ ОБРОБКИ ГАЗОПОДІБНИХ ВУГЛЕВОДНІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ

Проведено дослідження електрофізичних характеристик режиму продуктивного синтезу нановуглецю. Визначено типові форми динамічних вольт-амперних характеристик, при яких здійснюється синтез вуглецевих наноматеріалів, та їх залежність від потужності в каналі розряду і довжини міжелектродного проміжку. Визначено функціонали, які характеризують форму розрядних імпульсів. На основі їх аналізу визначено найбільш інформативну характеристику для моніторингу довжини міжелектродного проміжку.

Ключові слова: електрофізичні характеристики, високовольтна обробка, газоподібні вуглеводні, синтез нановуглецю.

Вступ. Аналіз літературних джерел [1, 2, 3, 4] показав широкий спектр досліджень по всьому миру в області обробки газоподібних вуглеводнів, але відомі методи електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів (ВНМ) із вуглецевовмісних газів на сьогодні мають невелику продуктивність і високе питоме енергоспоживання. Метод обробки газоподібних вуглеводнів струмом кілогерцового діапазону [5], має високі показники продуктивності і якості отриманих ВНМ. Тому розвиток наукових основ та фізико-технічних принципів реалізації високочастотного методу синтезу з вуглецевовмісних газів аморфного нановуглецю є перспективним та потребує створення високочастотної електророзрядної технології та розробки спеціалізованого високовольтного електрообладнання для її реалізації. В зв'язку з цим визначення особливостей електрофізичних характеристик електророзрядного синтезу ВНМ є актуальною задачею.

Метою роботи є визначення електрофізичних характеристик високовольтної обробки газоподібних вуглеводнів, за якими здійснюється синтез вуглецевих наноматеріалів, і їх взаємозалежностей.

Матеріали дослідження. Для дослідження процесу високовольтної обробки газоподібних вуглеводнів електророзрядного синтезу використовувалась установка, опис якої наведено в [5], з джерелом живлення електричного розряду, побудованим за принципами, наведеними в [6]. Джерело живлення електричного розряду містить високочастотний інвертор напруги із послідовним резонансним контуром, паралельно якому підключено підвищуючий високовольтний трансформатор, вторинна обмотка якого замкнена на канал електричного розряду. Виконана за такою побудовою система є джерелом живлення із стабілізованим значенням середньоквадратичного струму. В режимі короткого замикання вихідний струм має трикутну форму. За підвищенням опору навантаження форма вихідного струму наближається до синусоїдальної. Напруга на виході такого джерела зумовлена параметрами навантаження.

Дослідження характеристик газового розряду проводилось в суміші вуглеводнів зі складом: пропан – 78 %, бутан та ізобутан – 12 %, суміш важких вуглеводнів – 5 %, вода та інше – 5 %.

При продуктивному режимі синтезу [7] можна виділити два характерних процеси – це пробій газовой

го середовища і самостійний газовий розряд в процесі синтезу ВНМ. Параметри цих процесів досі не досліджувались, їх опис відсутній.

Пробій здійснюється в момент часу, коли напруга в міжелектродному проміжку перевищує характерний потенціал підпалу розряду для даного газового середовища та обраної електродної системи. Розрядний струм в цей момент різко зростає й розряджає паразитну ємність вторинної обмотки підвищуючого трансформатора, в результаті чого напруга на каналі розряду різко падає, що у свою чергу викликає спад струму. За рахунок того, що електрична міцність розрядного проміжку частково відтворюється, а струм від перетворювача протягом часу одного імпульсу підвищує напругу на трансформаторі, таких коливань може бути декілька. На рис. 1, а цей процес можна спостерігати протягом першого періоду розрядних імпульсів (або декілька перших періодів). Як правило вже на другому періоді напруга на каналі розряду встановлюється біля стабілізованого значення, характерного для електричного розряду змінного струму, яке визначається тепловою дією струму та параметрами відводу тепла. Вже за кілька мілісекунд розряд має більш стаціонарну форму (див. рис. 1, б).

Для визначення напруги гарантованого пробою U_i для газової суміші проведено дослідження для різних довжин міжелектродного проміжку за атмосферним тиском. Потенціал підпалу (напруга гарантованого пробою) U_i і приведена напруженість електричного поля гарантованого пробою E_i/p відповідно до закону подібності [8] визначаються тільки відношенням pd (добуток тиску і відстані між електродами). За результатами вимірювання характеристик розряду, які наведено в [9], напруженість електричного поля гарантованого пробою E_i проміжку становить (у середньому) 2 кВ/мм, а питома робоча напруга синтезу нановуглецю E_s – 0,11 кВ/мм. За отриманими точками побудовано ділянки кривої гарантованого пробою для цієї суміші та робочої напруги в діапазоні режиму синтезу (див. рис. 2).

Аналіз питомих напруг показує, що різниця між напругою гарантованого пробою і робочою напругою синтезу відрізняється в середньому у 20 разів, що зумовлює вимоги до джерела живлення для електричного розряду у атмосфері газоподібних вуглеводнів в режимі продуктивного синтезу нановуглецю.

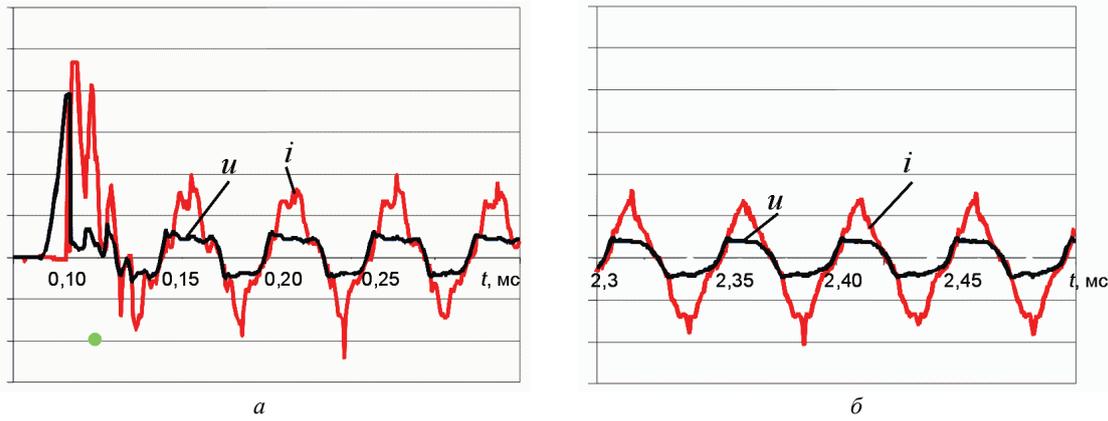


Рисунок 1 – Осцилограми розрядного струму

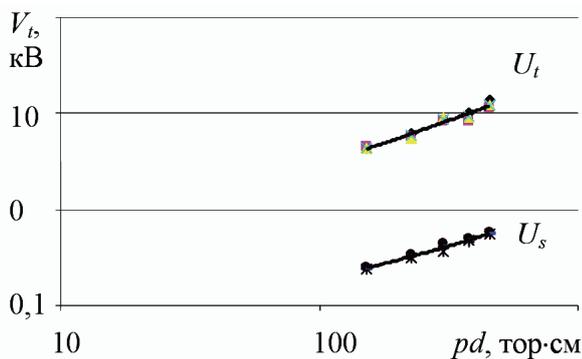
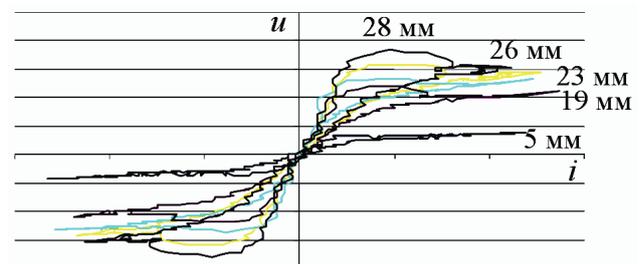
Рисунок 2 – Напруга гарантованого пробою U_t і напруга в режимі синтезу U_s 

Рисунок 3 – Форми динамічних ВАХ в режимі синтезу нановуглецю

Напруга синтезу на каналі розряду практично лінійно залежить від його довжини і не залежить від розрядного струму в області потужностей, які відповідають режиму продуктивного синтезу із найменшими питомими витратами енергії на одиницю маси отриманого нановуглецю (до 200 кДж/г).

Для дослідження інших характеристик газового розряду в режимі синтезу проаналізовано отримані за стабілізованим значенням середньоквадратичного розрядного струму для різних довжин міжелектродного проміжку осцилограми і побудовані на їх основі динамічні вольтамперні характеристики (ВАХ). Порівняння ВАХ, наведених на рис. 3, дозволяє стверджувати, що між зростанням довжини міжелектродного проміжку, напруги та потужності існує зв'язок.

Аналіз динамічних ВАХ показує, що величини розрядного струму і напруги характерні для тліючого розряду. Однак відомо, що динамічна ВАХ термостатованої електричної дуги має лінійну форму (лінійну залежність між струмом і напругою) [10]. В умовах, коли енергія дуги розсіюється, а її температура менша за температуру термодинамічної рівноваги, динамічна ВАХ дуги є ломаною і має як мінімум дві ділянки - лінійну ділянку (лінійну залежність між струмом і напругою) і ділянку, на якій напруга не перевищує деякого значення незалежно від струму. Якщо потужність електричного розряду ще зменшити, то на ВАХ з'явиться ділянка з від'ємним динамічним опором. Розсіювання енергії дуги зумовлює такі форми ВАХ. Якщо не здійснюється відвід тепла від каналу розряду (в умовах термостатованого розряду), динамічна ВАХ

є лінійною.

Провівши аналогію з досліджуваним розрядом, навіть без визначення його характеру, можна стверджувати, що витрати теплової енергії на синтез нановуглецю є каналом гарантованого відводу енергії. Зайва енергія витрачається на розігрів газового середовища. Тобто продуктивний синтез можливий тільки в умовах двох типів ВАХ (лінійноломаної – рис. 3 – ВАХ для довжини міжелектродного проміжку 5 мм), і з ділянками від'ємного динамічного опору (інші ВАХ на рис. 3), тобто в умовах динамічної рівноваги, за якою більша частина теплової енергії відводиться на синтез нановуглецю, а менша - на розігрів газового середовища.

Імпульси струму і напруги на рис. 3 і відповідні їм динамічні ВАХ мають складну форму, яка залежить від співвідношення довжини каналу розряду і потужністю в ньому. Для отримання залежностей між технологічними параметрами процесу синтезу ВМ і електричними характеристиками введено зручні для аналізу функціонали, декілька із яких є засобами формального опису форми ВАХ. Визначено показані на рис. 4 функціонали, що характерні для динамічних ВАХ в режимі синтезу нановуглецю: максимальне значення імпульсу напруги U_{CH_max} , напруга за максимальним значенням струму U_{CH_Imax} , максимальне значення струму I_{CH_max} . Крім того, для аналізу використано стандартні функціонали і характеристики: поточна напруга (миттєве значення) на каналі розряду $u_{CH}(t)$, середньоквадратична напруга

$$U_{CH_RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int u_{CH}(t)^2 dt}, \quad \text{середня напруга}$$

$$U_{CH_AV} = \frac{1}{T} \int u_{CH}(t) dt, \quad \text{поточний розрядний струм}$$

(миттєве значення) $i_{CH}(t)$, середньоквадратичний струм $I_{CH_RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i_{CH}(t)^2 dt}$, середній струм

$$I_{CH_AV} = \frac{1}{T} \int i_{CH}(t) dt, \quad \text{середня вихідна потужність}$$

$$P_{AV_OUT} = \frac{1}{T} \int i_{CH}(t) \cdot u_{CH}(t) dt.$$

Як функціонали також використано визначені коефіцієнти форми імпульсів.

$$k_{U_f1} = \frac{U_{CH_RMS}}{U_{CH_AV}}, \quad (1)$$

$$k_{U_f2} = \frac{U_{I_max}}{U_{CH_RMS}}, \quad (2)$$

$$k_{U_A} = \frac{U_{max}}{U_{I_max}}, \quad (3)$$

$$k_{I_f1} = \frac{I_{CH_RMS}}{I_{CH_AV}}, \quad (4)$$

$$k_{P_f1} = \frac{I_{CH_RMS} \cdot U_{CH_RMS}}{P_{AV}}. \quad (5)$$

Проведено експерименти для визначення коефіцієнтів форми імпульсів для стабілізованого струму і різної довжини міжелектродного проміжку, та побудовано відповідні залежності в нормованому вигляді (рис. 5).

Аналіз характеристик показав, що форма імпульсів змінюється при зміні довжини міжелектродного проміжку (для порівняння див. рис. 4). При збільшенні довжини міжелектродного проміжку коефіцієнт форми K_{U_f2} (2) збільшується, тобто форма імпульсів від трапецеїдальної має тенденцію наближення до трикутної, тобто горизонтальна ділянка характеристики підіймається вгору. Коефіцієнт K_{U_f1} (1) має таку ж тенденцію, але є менш чутливим до збільшення довжини проміжку. Коефіцієнт амплітуди (3) також підвищується, що показує підвищення різниці між напругою пробою і напругою горизонтальної ділянки імпульсу напруги. Але ця різниця значно менша ніж така, яка виникає при іскровому пробіі міжелектродного проміжку (див. рис. 1, а).

Залежності коефіцієнтів форми імпульсів струму, наведені на рис. 5, б, показують, що форма імпульсів також змінюється. За малою середньою вихідною потужністю (режим, наближений до короткого замикання розрядного проміжку) імпульс струму має майже трикутну форму, а при збільшенні довжини міжелектродного проміжку коефіцієнт форми показує тенденцію збільшення ввігнутих ділянок характеристики. При цьому коефіцієнт (4) змінюється незначно.

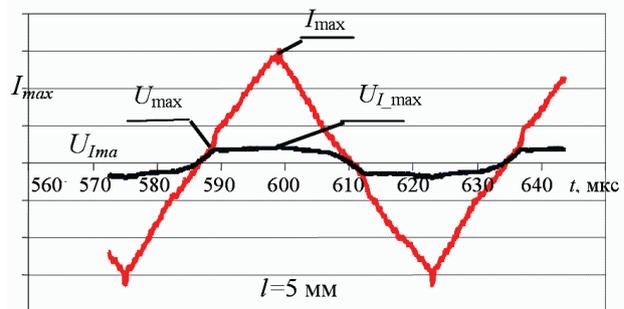
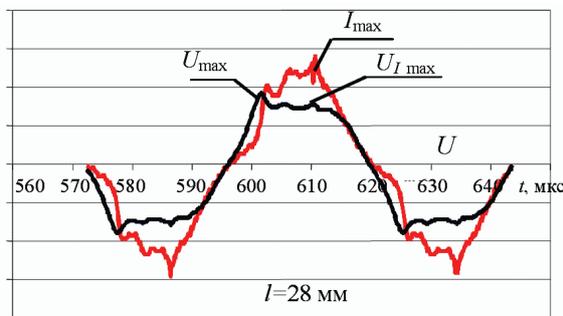


Рисунок 4 – Осцилограми для довжини міжелектродного проміжку 28 мм (а) і 5 мм (б)

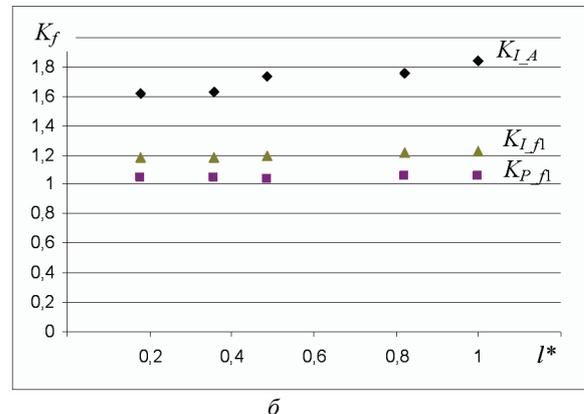
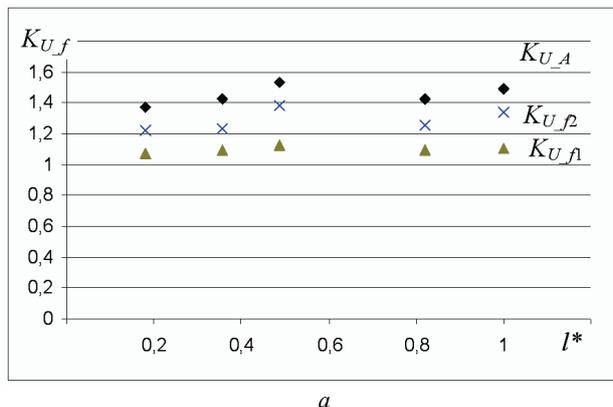


Рисунок 5 – Залежності коефіцієнтів форми імпульсів напруги K_U (а) та форми імпульсів струму K_I й потужності K_P (б) від довжини міжелектродного проміжку l^*

Найбільш постійний характер має коефіцієнт форми потужності $K_{P, \lambda}$ (5) (див. рис. 5, б), що дозволяє стверджувати, що незалежно від довжини каналу розряду і форми імпульсів зберігаються однакові відношення між середнім значенням вихідної потужності та добутком середньоквадратичних значень струму і напруги. Стандартне відхилення цих величин не перевищує 0,017, тобто на них найменше впливають випадкові процеси, властиві електричному розряду зі змінним міжелектродним проміжком.

Цей результат дає можливість використовувати для аналізу одночасно заданий стабілізований середньоквадратичний струм і середню потужність. Відповідно до (5) потужність пропорційна напрузі на каналі розряду, яка в свою чергу визначається довжиною міжелектродного проміжку (див. рис. 2). Таким чином, повинна існувати лінійна залежність між потужністю й довжиною каналу розряду. Також цей результат дає можливість визначати середньоквадратичну напругу на каналі розряду без її вимірювань в разі відомої потужності.

На рис. 6 показано експериментально отриману для двох значень стабілізованого приведенного середньоквадратичного струму $I_{CH_RMS_SH}^*$ залежність приведеної середньої вихідної потужності $P_{AV_OUT}^*$ від приведеної довжини міжелектродного проміжку l^* , яка має майже лінійну форму з величиною достовірності апроксимації близької до 1. Це є підставою для визначення довжини міжелектродного проміжку за результатами вимірювання вихідної потужності в каналі розряду. За формою ВАХ вихідна потужність є активною.

Для порівняння на рис. 7 показано залежності середніх значень визначених вище функціоналів, що описують форми імпульсів напруги, в нормованому вигляді для приведенного середньоквадратичного струму $I_{CH_RMS_SH}^* = 0,48$.

Характер цих залежностей від довжини міжелектродного проміжку дещо відрізняється від лінійного, хоча їх також можна апроксимувати лінійною функцією але із меншим коефіцієнтом достовірності ніж для потужності. Тобто, використання середнього значення вихідної потужності для визначення довжини міжелектродного проміжку є найбільш доцільним, ніж використання функціоналів, що визначають форми імпульсів напруги, тому що воно є більш інформативним і точним.

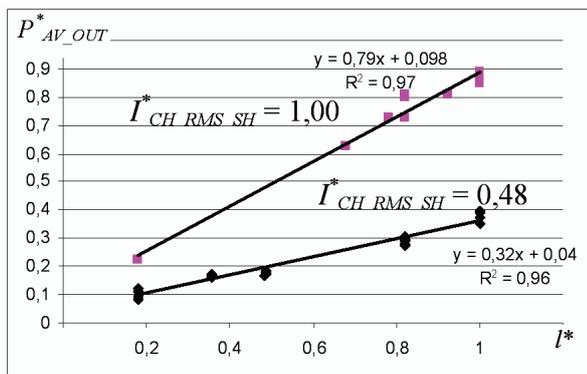


Рисунок 6 – Залежність вихідної потужності від довжини міжелектродного проміжку

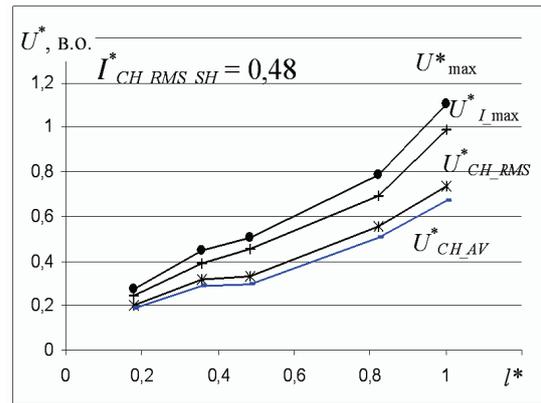


Рисунок 7 – Залежність характерних напруг від довжини міжелектродного проміжку

Висновки. Визначено електрофізичні особливості формування плазмового каналу у вуглецевмісному газі (суміші пропана - бутана). Показано, що напруга гарантованого пробою вуглецевмісної газової суміші відрізняється від робочої напруги синтезу у 20 разів.

Отримано характерні форми динамічних ВАХ електричного розряду, що відповідають випадку активного відводу від каналу розряду енергії, яка витрачається на синтез ВНМ, тобто випадку нерівноважної плазми.

Визначено коефіцієнти форми розрядних імпульсів, необхідних для аналізу залежностей електричних характеристик від довжини міжелектродного проміжку. Аналіз експериментально отриманих коефіцієнтів форми дозволив визначити найбільш стабільну характеристику для визначення довжини міжелектродного проміжку, якою є вихідна потужність.

Список літератури: 1. Чурилов Г.Н. Получение фуллеренов и нанотрубок в угольной плазменной струе килогерцового диапазона частот / Г.Н. Чурилов, А.Я. Корец, Я.Н. Татаренко // ЖТФ. – 1996. – Т. 66, вып. 1. – С. 191-194. 2. Shenqiang Zhao, Ruoyu Hong, Zhi Luo, Haifeng Lu, Biao Yan Carbon Nanostructures Production by AC Arc Discharge Plasma Process at Atmospheric Pressure // Hindawi Publishing Corporation. Journal of Nanomaterials. – Vol. 2011. – Article ID 346206. – 6 p. 3. Антипов В. Б. Получение нанотрубок из природного газа в плазме СВЧ-разряда / В. Б. Антипов, Ю. В. Медведев, С. А. Фирсов, Ю. И. Цыганок // Доклады ТУСУРа. – Декабрь 2011. – № 2 (24), часть 2. 4. Method of production of fluorinated carbon nanostructures. United States Patent N0: US 7,939,141 B2 Date of Patent: May 10, 2011. Edward Stephen Matthews, Bedfordshire (GB); Xiaoming Duan, Essex (GB); Richard Llewellyn Powell, Chester (GB). 5. Богуславський Л. З. Високовольтна установка для синтезу нановуглецю з onion-like структурою з системою керування електричними характеристиками газового розряду / Л. З. Богуславський, Д. В. Вінниченко, Н. С. Назарова // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С.11-23. 6. Вінниченко Д. В. Розробка принципів керування режимними параметрами електротехнічної системи для електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів / Д. В. Вінниченко, Н. С. Назарова // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 12 (1121). – С. 292-297. 7. Богуславський Л. З. Физические процессы синтеза аморфного нанотрубок высокочастотным электроразрядным методом из газообразных углеводородов / Л. З. Богуславский, Д. В. Вин-

ниченко, Н. С. Назарова, Л. Е. Овчинникова // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 52 (958). – С. 25-30. **8.** Райзер Ю. П. Физика газового разряда: Учеб. руководство / Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1987. – 592 с. **9.** Винниченко Д. В. Визначення оптимальних характеристик високовольтної електророзрядної системи для реалізації технології електроімпульсного синтезу нановуглецю / Д. В. Винниченко // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 129-131. **10.** Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи. Ч.2. Дуговые печи : Учебное пособие для вузов / А. Д. Свенчанский, М. Я. Смеляков. – М.: Энергия, 1970. – 264 с.

Bibliography (transliterated): 1. Churilov, G.N., Korets, A. Ya., Tatarenko, Ya. N. Poluchenie fullerenov i nanotrub v ugolnoy plazmennoy strue kilogertsovogo diapazona chastot, ZhTF, 1996, 1(66), 191-194. 2. Shenqiang Zhao, Ruoyu Hong, Zhi Luo, Haifeng Lu and Biao Yan. Carbon Nanostructures Production by AC Arc Discharge Plasma Process at Atmospheric Pressure. Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials, Volume 2011, Article ID 346206, 6 pages. 3. Antipov, V. B., Medvedev, Yu. V., Firsov, S. A., Tsyiganok, Yu. I. Poluchenie nanouglerodnykh struktur iz prirodnogo gaza v plazme SVCh-razryada. Doklady TUSURa, 2011, 2(24), chast 2. 4. Method of production of fluorinated carbon nanostructures. United States Patent Patent No.: US 7,939,141 B2 Date of Pat-

ent: May 10, 2011. Edward Stephen Matthews, Bedfordshire (GB); Xiaoming Duan, Essex (GB); Richard Llewellyn Powell, Chester (GB). 5. Bohuslavskiy, L. Z., Nazarova, N. S., Vinnychenko, D. V. Vysokovoltna ustanovka dlia syntezu nanovuhletsiu z onion-like strukturoiu z systemoiu keruvannia elektrychnymy kharakterystykamy hazovoho rozriadu. Visnyk NTU «KhPI», 2015, 20 (1129), 11-23. 6. Vinnychenko, D. V., Nazarova, N. S. Rozrobka pryntsyviv keruvannia rezhymnymy parametryamy elektrotekhnichnoi systemy dlia elektrorozriadnogo syntezu vuhletsevnykh nanomaterialiv. Visnyk Natsionalnoo tekhnichnogo universytetu "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI", 2015, 12 (1121), 292-297. 7. Boguslavskiy, L. Z., Vinnichenko, D. V., Nazarova, N. S., Ovchinnikova, L. E. Fizicheskie protsessy synteza amorfnoho nanougleroda vyisokochastotnym elektrorazryadnym metodom iz gazoobraznykh uglevodorodov. Visnyk NTU «HPI», 2012, 52 (958), 25-30. 8. Rayzer, Yu. P. Fizika gazovogo razryada: Ucheb. rukovodstvo. Moscow: Nauka. 1987, 592. 9. Vinnychenko, D.V. Vyznachennia optymalnykh kharakterystyk vysokovoltnoi elektrorozriadnoi systemy dlia realizatsii tekhnolohii elektroimpulsnogo syntezu nanovuhletsiu. Tekhnichna elektrodynamika, 2014, 4, 129-131. 10. Sвенчанский, А. Д., Смеляков, М. Я. Электрические промышленные печи. Ч.2. Дуговые печи. Учебное пособие для вузов. Moscow: Energiya, 1970. 264.

Надійшло (received) 05.02.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Богуславський Леонід Зиновійович – кандидат технічних наук, доцент, в.о. зав. наук. відд. Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТТ) НАН України, м. Миколаїв; тел: (0512) 58-71-39; e-mail: dpes@iipt.com.ua.

Bohuslavskiy Leonid Zynoviyovych – Ph.D., Associate Professor, Acting Head. Science. give. Institute Pulse Processes and Technologies NAS of Ukraine (IPPT NASU), Mykolaiv; Tel: (0512) 58-71-39; e mail: dpes@iipt.com.ua.

Винниченко Дмитро Валерійович – Молодший науковий співробітник; Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТТ) НАН України, e-mail: vdvvvs@inbox.ru.

Vinnichenko Dmitro Valerijovich – Junior scientific researcher; Institute Pulse Processes and Technologies NAS of Ukraine (IPPT NASU), Mykolaiv, e-mail: vdvvvs@inbox.ru.

Назарова Наталія Станіславівна – кандидат технічних наук, доцент, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТТ) НАН України, м. Миколаїв.

Nazarova Natalia Stanislavivna – Ph.D., Associate Professor, Institute Pulse Processes and Technologies NAS of Ukraine (IPPT NASU), Mykolaiv.

Адамчук Юрій Олегович – Магістр електротехніки, інженер, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТТ) НАН України, м. Миколаїв.

Adamchuk Yuriy Olegovich – Master of Electrical Engineering, engineer, Institute Pulse Processes and Technologies NAS of Ukraine (IPPT NASU), Mykolaiv.

Чушчак Сергій Володимирович – Інженер, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТТ) НАН України, м. Миколаїв.

Chushchak Serhiy Volodymyrovych – Engineer, Institute Pulse Processes and Technologies NAS of Ukraine (IPPT NASU), Mykolaiv.

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Л. З. БОГУСЛАВСКИЙ, В. В. ДИОРДИЙЧУК

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ КАК НАГРУЗКА ИСТОЧНИКОВ КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Рассмотрены вопросы изменения характера нагрузки систем комбинированного питания электростатических фильтров в процессе улавливания пыли с известными значениями удельного электрического сопротивления при формировании слабопроводящего слоя на поверхности осадительного электрода. Установлена взаимосвязь величины напряжения прикладываемого к газовому промежутку с толщиной слоя осевшей пыли, позволяющая судить о интенсивности коронного разряда в данных условиях и режиме работы источника питания постоянного напряжения. Установлен характер изменения электрической емкости электродной системы в зависимости от толщины слоя осевшей пыли.

Ключевые слова: электростатическая фильтрация, толщина слоя пыли, комбинированное питание, эффект запирания коронного разряда.

Введение. Основной объем выбрасываемых котлами тепловых электростанций в атмосферу газов очищается электростатическими фильтрами (ЭФ). Вопросы повышения их производительности посредством поиска новых способов осуществления электропитания и совершенствования систем управления комплексами электропитания не теряют актуальности уже на протяжении более чем 20 лет. Способ одновременного питания ЭФ постоянным и импульсным напряжением – одно из подобных решений, которое предлагается применять для повышения производительности в случае улавливания «тяжелой» пыли с высоким удельным сопротивлением и характерными размерами порядка 1 мкм. С другой стороны, данный способ характеризуется взаимным влиянием режимов источников импульсного и постоянного напряжения связанных посредством технологической нагрузки. Углубленное изучение процессов протекающих в зоне осаждения пыли позволит определить и связать режимы источников питания.

Анализ предварительных исследований. Обычно для питания ЭФ применяют постоянное напряжение [1, 4]. Известен опыт применения переменного, прерывистого и других типов напряжения для повышения качества фильтрации в случае улавливания высокоомной пыли и агрессивных туманов [5]. В работах [4, 5] показано, что суммирование постоянного напряжения с импульсным может уменьшить запыленность газов на выходе ЭФ и снизить влияние эффекта обратного коронирования осадительного электрода (ОЭ). Для формирования суперпозиции напряжений зачастую используют два источника питания, каждый из которых формирует определенную составляющую напряжения, и нагружаются одной технологической нагрузкой. Процессы, происходящие в нагрузке, определяют и связывают режимы работы источников напряжения. Кроме того, какие-либо изменения режима одного из источников непосредственно через нагрузку влияют на режим второго источника независимо от схемы соединения источников и нагрузки.

Целью работы является определение характера изменения активной и емкостной составляющей технологической нагрузки в пределах диапазона регулирования источников питания для одного технологического

цикла.

Зачастую нагрузкой источников электрической энергии в пластинчатом ЭФ является электродная система (ЭС) «острие – плоскость» с отрицательным потенциалом на острие. Подача высокого напряжения на электроды-острия вызывает зажигание коронного разряда (КР) в разрядном промежутке в объеме очищаемого газа. КР является источником заряженных ионов и электронов, которые оседают на поверхности пылевых частиц, тем самым пылевые частицы приобретают электрический заряд. Под действием сил внешнего электрического поля КР заряженные пылевые частицы начинают двигаться по направлению к заземленному ОЭ, после чего оседают на нем и удерживаются силами адгезии. При нарастании слоя осевшей пыли на ОЭ с некоторой периодичностью происходит встряхивание ОЭ и коронирующего электрода (КЭ) для очистки от осевшей пыли, часть которой после встряхивания попадает в пылесборочный бункер, а часть возвращается в поток очищаемого газа [1,4].

В литературе [10] для чистых электродов ЭФ схема замещения (рис. 1), нагрузка рассматривается как активно-емкостная и учитывает нелинейную форму вольт-амперной характеристики $R_{диф}$, токи утечки по поверхностям высоковольтных изоляторов $R_{ут}$, постоянную электрическую емкость C конструктивных элементов ЭФ, емкость ЭС $C_{диф}$ ЭФ.

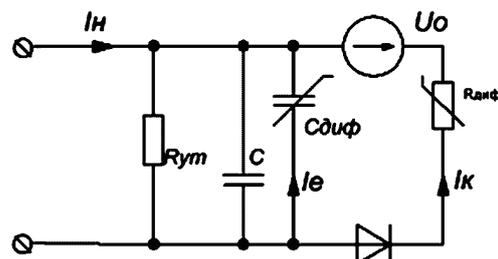


Рисунок 1 – Схема замещения ЭС ЭФ как нагрузки источника питания

Величина напряжения источника ЭДС U_0 эквивалентна напряжению зажигания КР. Диод D соответствует запирающим свойствам КР при напряжениях ниже напряжения зажигания. Поскольку в рамках данной статьи рассматриваются источники с униполярным питанием отрицательного потенциала, то зажига-

ние КР при смене полярности не рассматривается. Также, величинами токов утечки и конструктивной электрической емкости ЭФ по сравнению с током КР и емкостью ЭС можно пренебречь.

Величину линейной плотности постоянного тока КР $I_{КР}$ на единицу длины КЭ, можно определить исходя из выражения Дейча [3] для пластинчатых ЭФ.

$$I_{КР} = 4\pi\epsilon_0 K \cdot H^{-2} \ln^{-1} \frac{d}{r_0} \cdot (U - U_0) \cdot U, \quad (1)$$

где K – коэффициент, характеризующий подвижность ионов, $m^2/V \cdot c$; H – длина разрядного промежутка, м; d – шаг коронирующих элементов, м; r_0 – радиус коронирующего элемента, м; U_0 – напряжение зажигания КР, В.

В промышленных ЭФ площадь КЭ может достигать $S_{КЭ} > 700 m^2$, а осаждающих электродов (ОЭ) еще больше ($S_{ОЭ} \sim 36000 m^2$) [1, 2], тогда при длине промежутка $H < 400$ мм, шаге $d \sim 0,15-0,35$ м и радиусе $r_0 \sim 1$ мм емкость ЭС можно определять по формуле:

$$C_{эс} = \epsilon\epsilon_0 S_{КЭ} H^{-1}. \quad (2)$$

С учетом емкостной составляющей тока КР в ЭФ при его питании импульсно-периодическим напряжением с постоянной составляющей можно использовать выражение [6,7,8]:

$$i_{н}(t) = A \cdot (u(t) - U_0) \cdot u(t) + C_{эс} \frac{du(t)}{dt}, \quad (3)$$

где $A = 4\pi\epsilon_0 K \cdot H^{-2} \ln^{-1} d/r_0$ – размерный коэффициент характеризующий геометрию электродной системы и свойства газа в разрядном промежутке.

Тем не менее, приведенные выше выражения справедливы для чистых электродов. В процессе работы ЭФ на ЭС оседает пыль, изменяя характеристики технологической нагрузки. Пыль, улавливаемая ЭФ, характеризуется удельным электрическим сопротивлением ($УЭС$) $\rho_{п}$ в диапазоне от 10^4 до 10^{12} Ом·м и относительной диэлектрической проницаемостью (ОДП) $\epsilon_{п}$ 1,5-20 единиц [4]. Таким образом, при оседании пыли на ЭС изменяются как вольтамперная характеристика ЭС так и ее электрическая емкость.

Если к ЭС ЭФ приложено напряжение выше напряжения зажигания КР и через промежуток протекает ток, то образование слоя пыли приведет к возникновению падения напряжения на слое, тем самым

Приравняем токи $I_{КР}$ и приведем указанную систему уравнений к $U_{пр}(h_{сл})$:

$$U_{пр}(h_{сл}) = \frac{A\rho_{сл}h_{сл}L_{кэ}U_0 - S_{ОЭ} + \sqrt{(A\rho_{сл}h_{сл}L_{кэ}U_0)^2 + 2A\rho_{сл}h_{сл}L_{кэ}S_{ОЭ}(2U_{эс} - U_0) + S_{ОЭ}^2}}{2A\rho_{сл}h_{сл}L_{кэ}}, \quad (5)$$

где $\rho_{сл}$ – УЭС улавливаемой пыли Ом·м; $h_{сл}$ – толщина слоя осевшей пыли, м; $L_{кэ}$ – погонная длина КЭ, м.

Равенство (5) позволяет определить напряжение, приложенное к газовому промежутку в зависимости от толщины слоя пыли осевшей на электроде для известных конструктивных параметров ЭФ и УЭС пыли. На рис. 3 приведена зависимость для $U_{пр}(h_{сл})$ для технических характеристик ЭФ, указанных в литературном источнике [9].

Из рис. 3 видно, что по мере роста слоя пыли на ОЭ напряжение, приложенное к газовому промежутку $U_{пр}$ снижается от напряжения питания ЭФ $U_{эс}$ до на-

сняя напряжение, прикладываемое к газовому промежутку и снижению тока, протекающего через газовый промежуток. Схематически распределение падений напряжения, слой пыли, осевшей на ОЭ, показаны на рис. 2.

Рассмотренную выше взаимосвязь можно описать системой уравнений (4).

$$\begin{cases} U_{эс} = U_{пр} + U_{сл}; \\ I_{КР} = \frac{U_{сл} S_{ОЭ}}{\rho_{п} h_{сл}}; \\ I_{КР} = A(U_{пр} - U_0) U_{пр} L_{кэ}, \end{cases} \quad (4)$$

где $I_{КР}$ – ток КР, А; $\rho_{п}$ – удельное электрическое сопротивление пыли, Ом·м; $L_{кэ}$ – погонная длина КЭ, м; $S_{ОЭ}$ – площадь поверхности ОЭ, m^2 .

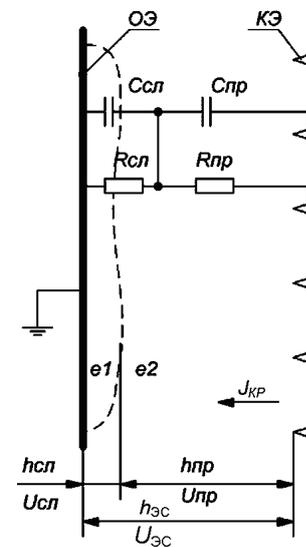


Рисунок 2 – Влияние слоя пыли на характер нагрузки комбинированного источника питания, где $R_{сл}$ – сопротивление слоя пыли, $R_{пр}$ – сопротивление газового промежутка, $C_{сл}$ – емкость слоя пыли, $C_{пр}$ – емкость газового промежутка, $U_{эс}$ – напряжение на ЭС, $U_{пр}$ – напряжение на газовом промежутке, $U_{сл}$ – напряжение на слое пыли, $h_{пр}$ – ширина газового промежутка, $h_{эс}$ – межэлектродное расстояние, $h_{сл}$ – толщина слоя пыли, $J_{КР}$ – плотность тока КР, ОЭ – осадительный электрод, КЭ – коронирующий электрод

пряжения зажигания КР U_0 , тем самым снижая интенсивность горения КР и эффективность улавливания пыли. Асимптотическое приближение зависимости $U_{пр}(h_{сл})$ к напряжению зажигания КР U_0 описывает известный эффект запирания КР при оседании пыли с высоким удельным электрическим сопротивлением на ОЭ. С другой, стороны рост напряжения приложенного к слою пыли $U_{сл}(h_{сл})$ повышает вероятность пробоя слоя и возникновения обратной короны.

Слой пыли с конечной диэлектрической проницае-

мостью $\epsilon_{\text{П}}$ обладает электрической емкостью $C_{\text{сл}}$. В данном случае роль обкладок выполняют заземленный ОЭ и внешняя поверхность слоя пыли с потенциалом равным $U_{\text{сл}}$. Поверхность КЭ и поверхность слоя пыли также образуют электрическую емкость $C_{\text{пр}}$ включенную последовательно с $C_{\text{сл}}$. Емкость $C_{\text{сл}}$ и $C_{\text{пр}}$ определяют суммарную емкость ЭС, величина которой также будет зависеть от слоя осевшей на электродах пыли:

$$\frac{1}{C_{\text{ЭС}}} = \frac{h_{\text{сл}}}{\epsilon_{\text{П}}\epsilon_0 S_{\text{ОЭ}}} + \frac{h_{\text{пр}}}{\epsilon_{\text{Г}}\epsilon_0 S_{\text{КЭ}}} \quad (6)$$

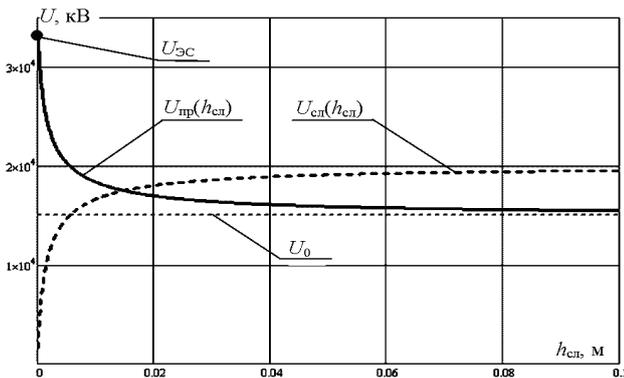


Рисунок 3 – Изменение распределения напряжений в разрядном промежутке ЭС ЭФ при оседании слоя пыли на электродах.

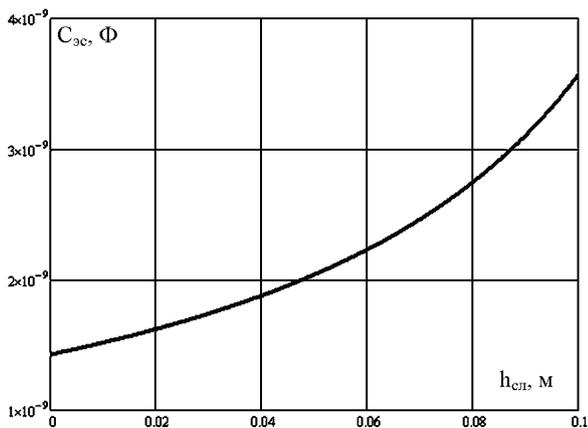


Рисунок 4 – Характер изменения электрической емкости ЭС при оседании слоя пыли на осадительный электрод.

Преобразуя выражение 6 относительно в $h_{\text{сл}}$ получим:

$$C_{\text{ЭС}}(h_{\text{сл}}) = \frac{\epsilon_{\text{Г}}\epsilon_{\text{П}}\epsilon_0 S_{\text{КЭ}} S_{\text{ОЭ}}}{h_{\text{сл}}\epsilon_{\text{Г}}(S_{\text{КЭ}} - S_{\text{ОЭ}}) + \epsilon_{\text{П}} S_{\text{ОЭ}} h_{\text{сл}}}, \quad (7)$$

где $\epsilon_{\text{Г}}$ – диэлектрическая проницаемость газа, $\epsilon_{\text{П}}$ – диэлектрическая проницаемость пыли, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, $S_{\text{КЭ}}$ – площадь КР, м^2 , $S_{\text{ОЭ}}$ – площадь ОЭ, м^2 .

При питании ЭФ источником постоянного напряжения, входящим в состав системы комбинированного питания, характер изменения емкости ЭС не представляет особого интереса и не влияет на режим работы источника напряжения. Определяющее влияние имеет толщина слоя пыли на ОЭ и его УЭС.

Использование источников комбинированного питания призвано формировать импульсно-периоди-

ческое напряжение с постоянной составляющей на ЭС ЭФ. Формирование импульсов напряжения определенной длительности и амплитуды во многом зависит от характера нагрузки источника импульсного питания. Длительность фронта импульса для источников такого типа пренебрежимо мала в сравнении со средним. В свою очередь, срез импульса напряжения определяется характером нагрузки и зависит от постоянной времени ЭС. Постоянная времени ЭС формируется общей емкостью электродной системы и общим сопротивлением протеканию тока КР. Учитывая приведенные выше зависимости постоянную времени ЭС в зависимости от слоя осевшей пыли и приложенного к ЭС напряжения можно выразить как:

$$\tau_{\text{ЭС}}(U_{\text{ЭС}}, h_{\text{сл}}) = \frac{U_{\text{ЭС}} C(h_{\text{сл}})}{A(U_{\text{пр}}(h_{\text{сл}}) - U_0) U_{\text{пр}}(h_{\text{сл}}) L_{\text{КЭ}}}. \quad (8)$$

Полученное в результате выражение для постоянной времени ЭС является важнейшей характеристикой необходимой для дальнейшего проектирования источников комбинированного питания для улавливания пыли с высоким удельным сопротивлением. Величина постоянной времени для некоторых условий работы фильтра позволяет определить диапазон регулирования частоты следования импульсов напряжения формируемых импульсным источником для реализации различных режимов питания электрофильтра. Также, диапазон регулирования частоты позволяет оценить мощность источника импульсного напряжения, необходимую для реализации комбинированного питания ЭФ.

Список литературы. 1. Алиев Г.М. Электрооборудование и режимы питания электрофильтров / Г.М. Алиев, А.Е. Гоник. – М.: Энергия, 1968. – 128 с. **2.** Богуславский Л.З. Создание макетных образцов высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов / Л.З. Богуславский, Л.Н. Мирошниченко, В.В. Диордийчук, Д.В. Винниченко, Н.С. Ярошинский // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2012. – № 52 (958). – С. 31-38. **3.** Богуславский Л.З. Высоковольтный высокочастотный импульсный источник питания для повышения эффективности систем газоочистки / Л.З. Богуславский, В.В. Диордийчук, Л.Н. Мирошниченко, Ю.Г. Казарян, Н.С. Ярошинский // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 99–100. **4.** Санаев Ю.И. Обеспыливание газов электрофильтрами / Ю.И. Санаев. – Семибратово: Кондор-Эко, 2009. – 170 с. **5.** Переводчиков В.И. Источники знакопеременного, импульсного и импульсно-знакопеременного питания электрофильтров / В.И. Переводчиков, В.Н. Шапенко, А.В. Щербаков, В.Г. Калинин, В.М. Стученков // Электрические станции. – 2003. – № 1. – С. 56–61. **6.** Щерба А.А. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений / А.А. Щерба, Н.И. Супруновская // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 3–9. **7.** Щерба А.А. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов / А.А. Щерба, Н.И. Супруновская // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 1. – С. 3–11. **8.** Диордийчук В.В. Регулирование параметров источников импульсного и постоянного напряжений при одновременном питании электрофильтров / В.В. Диордийчук // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 132–134. **9.** Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами / В.Н. Ужов. – М.: Химия, 1967. – 344 с. **10.** Чекалов Л.В. Электри-

ческие режимы и источники питания электрофильтров // *Л.В. Чекалов // Промышленная и санитарная очистка газов.* - 1982. - С. 1-18.

Bibliography (transliterated): 1. Aliev G.M., Gonik A.E. *Jelektrooborudovanie i rezhimy pitaniya jelektrofil'trov.* Moscow: Jenergija, 1968. 128 p. 2. Boguslavskij L.Z. L.N. Miroshnichenko, V.V. Diordijchuk, D.V. Vinnichenko, N.S. Jaroshinskij. *Sozdanie maketnyh obrazcov vysokovol'tnogo oborudovanija kompleksnyh sistem jelektrofil'tracii jekologicheskij opasnyh promyshlennyh vybrosov.* Visnik NTU "KhPI". Serija: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. 2012. No 52 (958). pp. 31-38. 3. Boguslavskij L.Z. V.V. Diordijchuk, L. N. Miroshnichenko, Ju. G. Kazarjan, N. S. Jaroshinskij *Vysokovol'tnyj vysokochastotnyj impu'snyj istochnik pitaniya dlja povyshenija jeffektivnosti sistem gazoochistki.* Tehn. elektrodinamika. 2012. No 2. pp. 99-100. 4. Sanaev Ju.I. *Obespylivanie gazov jelektrofil'trami.* Semibratovo: Kondor-Eko. 2009. 170 p. 5. Perevodchikov V.I., Shapenko V.N., Shherbakov A.V., Ka-

linin V.G., Stuchenkov V.M. *Istochniki znakoperemennogo, impu'snogo i impu'sno-znakoperemennogo pitaniya jelektrofil'trov.* Jelektricheskie stancii. 2003. No 1. pp. 56-61. 6. Shherba A.A., Suprunovskaja N.I. *Zakonomernosti povyshenija skorosti narastanija razrjadnyh tokov v nagruzke pri ogranichenii ih maksimal'nyh znachenij.* Tehn. elektrodinamika. 2012. No 5. pp. 3-9. 7. Shherba A.A., Suprunovskaja N.I. *Sintez jelektricheskijh cepej s emkostnymi nakopiteljami jenergii v poluprovodnikovyh formirovateljah moshhnyh razrjadnyh impu'sov.* Tehn. elektrodinamika. 2014. No 1. pp. 3-11. 8. Diordijchuk V.V. *Regulirovanie parametrov istochnikov impu'snogo i postojannogo naprjazhenij pri odnovremennom pitanii jelektrofil'trov.* Tehn. elektrodinamika. 2014. No 4. pp. 132-134. 9. Uzhov V.N. *Ochistka promy'shlenny'kh gazov e'lektrofil'trami.* Moscow: Himiia, 1967. 344 p. 10. Chekalov L.V. *E'lektricheskie rezhimy i istochniki pitaniia e'lektrofil'trov.* Promy'shlennaia i sanitarnaia ochistka gazov. 1982. pp. 1-18

Поступила (received) 05.02.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Богуславский Леонид Зиновьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев; тел.: (063) 474-60-50; e-mail: boguslavsky@mail.ru.

Boguslavskiy Leonid Zinov'evich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies, Mykolaiv; phone.: (063) 474-60-50; e-mail: boguslavsky@mail.ru.

Диордийчук Виталий Владимирович – младший научный сотрудник Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев; тел.: (063) 816-17-51; e-mail: redlineone86@gmail.com

Diordiychuk Vitaliy Vladimirovich – Junior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies, Mykolaiv; phone.: (063) 816-17-51; e-mail: redlineone86@gmail.com

УДК 621.317

О. Ю. ГЛЕБОВ, С. В. КИПРИЧ, Г. М. КОЛИУШКО, А. В. ПЛИЧКО

ПРОВЕРКА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНИВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ

Приведены основные требования нормативных документов, предъявляемые к основной и дополнительной системам уравнивания потенциалов (СУП). Показано, что можно использовать в качестве защитных проводников СУП, их сечение, каким образом прокладывать и выполнять соединение и присоединение защитных проводников. Приведен перечень документов, передаваемых монтажной организацией при передаче электроустановки в эксплуатацию, содержание паспорта на заземляющее устройство (ЗУ) электроустановки. Описаны мероприятия, предназначенные для проверки состояния СУП. Приведены примеры проведения проверок СУП. Сформулированы основные недостатки выполнения СУП. Основной вывод: проверку состояния СУП целесообразно совмещать с проверкой ЗУ и СМЗ.

Ключевые слова: электробезопасность, заземление, уравнивание потенциалов, испытание электроустановок.

Введение. Основными нормативными документами, регламентирующими требования к СУП, являются [1 – 10]. *Основное правило обеспечения электробезопасности* сформулировано в Правилах устройства электроустановок (п. 1.7.54) [1]: «Опасные токоведущие части электроустановки не должны быть доступными для случайного прямого прикосновения к ним, а доступные для прикосновения открытые и сторонние проводящие части не должны быть опасными как в нормальных условиях (эксплуатация электроустановки по назначению и без повреждений), так и в условиях единичного повреждения». Из этого правила следует, что единственным параметром, характеризующим электробезопасность, является напряжение прикосно-

вения.

Уравнивание потенциалов (см. п. 1.7.56 [1]) является одним из средств защиты, предназначенных для предотвращения поражения электрическим током в случае повреждения изоляции, наряду с защитным заземлением, выравниванием потенциалов и др. Указанные средства защиты гальванически соединены между собой, т.е. представляют собой некую единую систему обеспечения электробезопасности. Поэтому проверку (диагностику) систем уравнивания (СУП) и выравнивания (СВП) потенциалов целесообразно совмещать во времени с проверкой заземляющего устройства (ЗУ) и системы молниезащиты (СМЗ). Это в равной степени относится не только к энергетическим

© О. Ю. Глебов, С. В. Киприч, Г. М. Колиушко, А. В. Пличко, 2016

ческие режимы и источники питания электрофильтров // *Л.В. Чекалов // Промышленная и санитарная очистка газов.* - 1982. - С. 1-18.

Bibliography (transliterated): 1. Aliev G.M., Gonik A.E. *Jelektrooborudovanie i rezhimy pitaniya jelektrofil'trov.* Moscow: Jenergija, 1968. 128 p. 2. Boguslavskij L.Z. L.N. Miroshnichenko, V.V. Diordijchuk, D.V. Vinnichenko, N.S. Jaroshinskij. *Sozdanie maketnyh obrazcov vysokovol'tnogo oborudovanija kompleksnyh sistem jelektrofil'tracii jekologicheskij opasnyh promyshlennyh vybrosov.* Visnik NTU "KhPI". Serija: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. 2012. No 52 (958). pp. 31-38. 3. Boguslavskij L.Z. V.V. Diordijchuk, L. N. Miroshnichenko, Ju. G. Kazarjan, N. S. Jaroshinskij *Vysokovol'tnyj vysokochastotnyj impu'snyj istochnik pitaniya dlja povyshenija jeffektivnosti sistem gazoochistki.* Tehn. elektrodinamika. 2012. No 2. pp. 99-100. 4. Sanaev Ju.I. *Obespylivanie gazov jelektrofil'trami.* Semibratovo: Kondor-Eko. 2009. 170 p. 5. Perevodchikov V.I., Shapenko V.N., Shherbakov A.V., Ka-

linin V.G., Stuchenkov V.M. *Istochniki znakoperemennogo, impu'snogo i impu'sno-znakoperemennogo pitaniya jelektrofil'trov.* *Jelektricheskie stancii.* 2003. No 1. pp. 56-61. 6. Shherba A.A., Suprunovskaja N.I. *Zakonomernosti povyshenija skorosti narastanija razrjadnyh tokov v nagruzke pri ogranichenii ih maksimal'nyh znachenij.* Tehn. elektrodinamika. 2012. No 5. pp. 3-9. 7. Shherba A.A., Suprunovskaja N.I. *Sintez jelektricheskijh cepej s emkostnymi nakopiteljami jenergii v poluprovodnikovyh formirovateljah moshhnyh razrjadnyh impu'sov.* Tehn. elektrodinamika. 2014. No 1. pp. 3-11. 8. Diordijchuk V.V. *Regulirovanie parametrov istochnikov impu'snogo i postojannogo naprjazhenij pri odnovremennom pitanii jelektrofil'trov.* Tehn. elektrodinamika. 2014. No 4. pp. 132-134. 9. Uzhov V.N. *Ochistka promy'shlenny'kh gazov e'lektrofil'trami.* Moscow: Himia, 1967. 344 p. 10. Chekalov L.V. *E'lektricheskie rezhimy i istochniki pitaniia e'lektrofil'trov.* *Promy'shlennaia i sanitarnaia ochistka gazov.* 1982. pp. 1-18

Поступила (received) 05.02.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Богуславский Леонид Зиновьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев; тел.: (063) 474-60-50; e-mail: boguslavsky@mail.ru.

Boguslavskiy Leonid Zinov'evich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies, Mykolaiv; phone.: (063) 474-60-50; e-mail: boguslavsky@mail.ru.

Диордийчук Виталий Владимирович – младший научный сотрудник Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев; тел.: (063) 816-17-51; e-mail: redlineone86@gmail.com

Diordiychuk Vitaliy Vladimirovich – Junior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies, Mykolaiv; phone.: (063) 816-17-51; e-mail: redlineone86@gmail.com

УДК 621.317

О. Ю. ГЛЕБОВ, С. В. КИПРИЧ, Г. М. КОЛИУШКО, А. В. ПЛИЧКО

ПРОВЕРКА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНИВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ

Приведены основные требования нормативных документов, предъявляемые к основной и дополнительной системам уравнивания потенциалов (СУП). Показано, что можно использовать в качестве защитных проводников СУП, их сечение, каким образом прокладывать и выполнять соединение и присоединение защитных проводников. Приведен перечень документов, передаваемых монтажной организацией при передаче электроустановки в эксплуатацию, содержание паспорта на заземляющее устройство (ЗУ) электроустановки. Описаны мероприятия, предназначенные для проверки состояния СУП. Приведены примеры проведения проверок СУП. Сформулированы основные недостатки выполнения СУП. Основной вывод: проверку состояния СУП целесообразно совмещать с проверкой ЗУ и СМЗ.

Ключевые слова: электробезопасность, заземление, уравнивание потенциалов, испытание электроустановок.

Введение. Основными нормативными документами, регламентирующими требования к СУП, являются [1 – 10]. *Основное правило обеспечения электробезопасности* сформулировано в Правилах устройства электроустановок (п. 1.7.54) [1]: «Опасные токоведущие части электроустановки не должны быть доступными для случайного прямого прикосновения к ним, а доступные для прикосновения открытые и сторонние проводящие части не должны быть опасными как в нормальных условиях (эксплуатация электроустановки по назначению и без повреждений), так и в условиях единичного повреждения». Из этого правила следует, что единственным параметром, характеризующим электробезопасность, является напряжение прикосно-

вения.

Уравнивание потенциалов (см. п. 1.7.56 [1]) является одним из средств защиты, предназначенных для предотвращения поражения электрическим током в случае повреждения изоляции, наряду с защитным заземлением, выравниванием потенциалов и др. Указанные средства защиты гальванически соединены между собой, т.е. представляют собой некую единую систему обеспечения электробезопасности. Поэтому проверку (диагностику) систем уравнивания (СУП) и выравнивания (СВП) потенциалов целесообразно совмещать во времени с проверкой заземляющего устройства (ЗУ) и системы молниезащиты (СМЗ). Это в равной степени относится не только к энергетическим

© О. Ю. Глебов, С. В. Киприч, Г. М. Колиушко, А. В. Пличко, 2016

объектам, но и к промышленным, а также к общественным зданиям и сооружениям.

1. Основные нормативные требования, предъявляемые к СУП

1.1 Термины и определения

Защитное уравнивание потенциалов (п. 1.7.38 [1]) – достижение одинакового значения потенциалов проводящих частей путем электрического соединения их между собой.

Защитное выравнивание потенциалов (п. 1.7.37 [1]) – уменьшение напряжения прикосновения и (или) напряжения шага путем укладки в землю или в проводящий пол или на их поверхности проводящих частей, присоединенных к заземляющему устройству, или путем использования специального покрытия земли (пола)

1.2 Общие требования к СУП

Защитное уравнивание потенциалов необходимо выполнять (п. 1.7.78 [1]) в помещениях и открытых установках, использующих такие средства защиты, как автоматическое отключение питания или защитное заземление. В случае осуществления защитного отключения питания в электроустановках напряжением до 1 кВ (п. 1.7.80 [1]) доступные прикосновению открытые проводящие части необходимо присоединять к РЕ-проводнику и создавать основную СУП, а при необходимости – также и дополнительную (местную) СУП.

Основная СУП (п. 1.7.84 [1]) должна соединять между собой такие проводящие части: защитные (PEN и PE) проводники электроустановки; заземляющий проводник повторного заземления на вводе в электроустановку; металлические трубы инженерных коммуникаций (водопровод, канализация, теплоснабжение и др.); металлические части строительных конструкций; металлические проводники, заложенные в проводящий пол (земляной, бетонный и др.) для выравнивания потенциалов между полом и открытыми проводящими частями электрооборудования; систему молниезащиты, при ее наличии, если нормативные документы по молниезащите не запрещают присоединять ее к защитному заземлению; металлические части систем вентиляции и кондиционирования; заземляющий проводник функционального заземления, при его наличии, если отсутствуют ограничения на присоединение сети функционального заземления к защитному заземлению; металлические оболочки телекоммуникационных кабелей.

Дополнительная СУП выполняется (п. 1.7.85 [1]) если не обеспечены требования по времени защитного отключения питания. Она должна соединять между собой все одновременно доступные прикосновению открытые проводящие части стационарного электрооборудования и сторонние проводящие части, включая металлические части строительных конструкций, а также защитные проводники всего электрооборудования.

В каждой электроустановке, в которой выполнена СУП, необходимо (п. 1.7.26 [1]) выполнить главную заземляющую шину (ГЗШ). Если здание имеет несколько отдельных вводов, то ГЗШ необходимо (п. 1.7.27 [1]) выполнять для каждого вводного уст-

ройства, а при наличии встроенных трансформаторных подстанций – для каждой из них.

1.3 Защитные проводники

В качестве защитных проводников СУП можно использовать (п. 1.7.31 [1]):

1) специально предусмотренные для этого проводники: жилы многожильных кабелей и проводов; изолированные или неизолированные проводники, стационарно проложенные и проложенные в ограждающей конструкции (трубе, коробе, лотке) совместно с фазными проводниками линии питания;

2) открытые проводящие части: металлические оболочки и экраны кабелей и проводов; металлические оболочки и опорные конструкции комплектных устройств и шинпроводов, входящих в состав электроустановки напряжением до 1 кВ; металлические коробки и лотки электропроводок, если их конструкция допускает такое использование и это указано в документации производителя; металлические трубы электропроводок;

3) некоторые сторонние проводящие части: металлоконструкции зданий и сооружений (фермы, колонны и т.д.); стальную арматуру железобетонных конструкций зданий и сооружений; металлоконструкции производственного назначения (подкрановые рельсы, галереи, площадки, шахты лифтов и подъемников, обрамление кранов и т.д.).

Не допускается использовать в качестве защитных проводников (п. 1.7.33 [1]) такие проводящие части: трубы газоснабжения и другие трубопроводы горючих или взрывоопасных жидкостей и смесей; трубы водоснабжения, канализации и центрального отопления; несущие тросы для тросовой проводки; свинцовые оболочки кабелей и проводов (если это не обосновано расчетами); конструктивные части, которые могут испытывать механические повреждения в нормальных условиях эксплуатации; металлические оболочки изоляционных трубок и трубчатых проводов, металлорукава и т.п.

1.4 Сечение защитных проводников

Сечение проводников основной СУП должно быть не менее: 6 мм² для меди; 16 мм² для алюминия; 50 мм² для стали (п. 1.7.149 [1]).

Сечение проводников дополнительной СУП (п. 1.7.150 [1]) должно обеспечивать проводимость не меньше, чем: в случае соединения двух открытых проводящих частей – проводимость наименьшего из защитных проводников, присоединенных к этим частям; в случае соединения открытой и сторонней проводящих частей – половину проводимости защитного проводника, присоединенного к открытой проводящей части.

Сечение медных проводников дополнительной СУП, которые не входят в состав кабелей или проводов питания и проложенных не в общей ограждающей конструкции с фазными проводниками, во всех случаях должно быть (п. 1.7.139 [1]) не менее чем: 2,5 мм² – при наличии механической защиты; 4 мм² – при отсутствии механической защиты.

1.5 Прокладка защитных проводников

Защитные проводники СУП и РЕ- проводники допускается прокладывать (п. 1.7.141 [1]) в земле, в полу, по краю фундаментов технологических установок и т. п. Не допускается прокладывать в земле неизолированные алюминиевые защитные проводники. В сухих помещениях без агрессивной среды защитные проводники можно прокладывать (п. 1.7.142 [1]) непосредственно по стенам. Во влажных, сырых помещениях, а также в помещениях с агрессивными средами защитные проводники необходимо прокладывать на расстоянии не менее 10 мм от стен.

1.6 Соединения и присоединения защитных проводников

Соединения и присоединения заземляющих и защитных РЕ- проводников, а также проводников СУП и СВП (п. 1.7.151 [1]) должны обеспечивать непрерывность электрической цепи. Соединение стальных проводников рекомендуется выполнять сваркой. В помещениях и открытых электроустановках без агрессивной среды допускается использовать другие способы соединения, которые обеспечивают требования ГОСТ 10434-82 [2] к соединениям класса 2. Соединения следует защищать от коррозии и механического повреждения. Для болтовых соединений необходимо использовать средства против ослабления контакта. В случае соединения проводников из разных материалов следует предусматривать средства против возможной электролитической коррозии.

Соединения должны быть доступны для осмотра и проведения испытаний (п. 1.7.152 [1]), за исключением соединений: заполненных компаундом или герметичных; соединений, находящихся в полу, стенах, перекрытиях, земле и т. п.; соединений, являющихся частью оборудования и выполненных в соответствии со стандартами или техническими условиями на это оборудование.

Защитные проводники, присоединенные к оборудованию, которое подлежит частому демонтажу или установлено на подвижных частях или испытывает тряску и вибрацию, должны быть гибкими (п. 1.7.154 [1]).

Присоединять каждую открытую проводящую часть электроустановки к РЕ-проводнику или к защитному заземлению нужно с помощью отдельных ответвлений (п. 1.7.159 [1]). Последовательно включать в РЕ-проводник или заземляющий проводник открытые проводящие части не допускается. Присоединять сторонние проводящие части к основной СУП нужно также с помощью отдельных ответвлений. Присоединять открытые и сторонние проводящие части к дополнительной СУП можно с помощью, как отдельных ответвлений, так и с помощью одного общего неразъемного проводника.

1.7 Электроустановки жилых, общественных, административных и бытовых зданий

На вводе в здание, – согласно требованиям п. 2.8.19 [3], предъявляемым к электроустановкам жилых, общественных, административных и бытовых зданий, – должна быть выполнена СУП путем объединения следующих проводящих частей: основной

(магистральный) защитный заземляющий проводник; основной (магистральный) заземляющий проводник или основной заземляющий зажим; стальные трубы междомовых коммуникаций и коммуникаций зданий; металлические части строительных конструкций, молниезащиты, системы центрального отопления, вентиляции и кондиционирования. Эти проводящие части должны быть соединены между собой на вводе в здание. На протяжении всей сети следует (п. 2.8.20 [3]) повторно выполнять дополнительное уравнивание потенциалов. К дополнительной СУП должны быть присоединены все доступные прикосновению открытые проводящие части стационарных электроустановок, сторонние проводящие части и нулевые защитные проводники всего электрооборудования (в том числе штепсельных розеток). Для ванн и душевых помещений дополнительная СУП является обязательной (п. 2.8.21 [3]). Нагревательные элементы, заложенные в пол, должны быть покрыты металлической сеткой или металлической оболочкой, присоединенными к СУП. Не допускается использование для саун, ванн и душевых помещений местной СУП.

1.8 Электроустановки во взрывоопасных зонах

Во взрывоопасных зонах всех классов, согласно требованиям п. 4.11.3 [3], предъявляемым к электроустановкам во взрывоопасных зонах, должно быть выполнено уравнивание потенциалов с использованием защитного электрического экранирования. При этом в системах TN и IT все открытые и сторонние проводящие части должны быть соединены в систему уравнивания потенциалов.

1.9 Прием-сдача в эксплуатацию ЗУ электроустановок

Во время приема-сдачи в эксплуатацию ЗУ электроустановок монтажной организацией в соответствии с требованиями п. 7.2 [4] должны быть предоставлены:

- утвержденная проектно-техническая документация на ЗУ;
- исполнительные схемы ЗУ, включая для электроустановок напряжением до 1 кВ схемы уравнивания потенциалов;
- основные параметры элементов заземлителей и защитных проводников;
- акты выполненных скрытых работ;
- протоколы приемо-сдаточных испытаний: протокол измерения сопротивления ЗУ; протокол определения напряжения на ЗУ (если нормируется); протокол определения напряжения прикосновения (если нормируется); протокол определения путей растекания тока с оборудования при КЗ или ударе молнии; протокол измерения сопротивления контактных соединений; протокол измерения полного сопротивления петли фаза-нуль (или тока однофазного КЗ); протокол измерения сопротивления изоляции; протокол измерения сопротивления контактных соединений.

1.10 Паспорт на ЗУ электроустановок

На каждое ЗУ, находящееся в эксплуатации, должен быть паспорт, который согласно Приложению В [5] должен содержать:

- общие сведения об электроустановке (название, дата введения в эксплуатацию, номинальное напряжение на шинах, режим заземления нейтрали, расчетный ток замыкания на землю, ток в нейтральных трансформаторов при замыканиях на землю, время срабатывания основной и резервной защит, оперативное ускорение);
- общие сведения о ЗУ электроустановки (название организаций, выполнивших проект и монтаж ЗУ, критерий проектирования ЗУ, проектная и исполнительная схемы ЗУ и СУП);
- конструктивные данные на ЗУ (размеры ЗУ, наибольшая диагональ ЗУ, параметры горизонтальных и вертикальных заземлителей, параметры элементов СУП, удельное сопротивление грунта);
- данные о конструктивных изменениях в ЗУ (вид работ, время проведения, организация-исполнитель, перечень изменений);
- данные о результатах проверок (ведомости осмотров, протоколы испытаний).

2. Проверка состояния СУП

2.1 Мероприятия, предназначенные для проверки состояния СУП

Проверка состояния ЗУ и СУП выполняется согласно [5] и таблице 25 Приложения 1 [4].

Периодичность проверок СУП должна соответствовать периодичности проверок ЗУ, поскольку эти объекты гальванически соединены между собой и выполняют во многом близкие (одинаковые) функции – прежде всего обеспечение электробезопасности.

Инструкция [5] предусматривает целый ряд процедур, предназначенных для проверки состояния ЗУ. Очевидно, что не все эти процедуры следует проводить для проверки состояния СУП. Целесообразно, по-видимому, проведение следующих измерений и проверок:

1. Визуальный осмотр видимой части СУП. Осмотр следует проводить не реже чем один раз в год, а также после КЗ или разрядов молнии (для СУП открытых электроустановок). В ходе осмотра проверяют сечение, целостность и прочность заземляющих и защитных проводников, их соединений и присоединений. При этом не должно быть обрывов и неудовлетворительных контактов у защитных проводников, соединяющих заземляемые элементы с заземлителем или ГЗШ, или СУП. Коррозионный износ не должен превышать 50 % первоначального сечения проводника.

2. Проверка конструктивного состояния СУП. Эту проверку следует проводить для нововведенных объектов и после капитального ремонта и реконструкции (переоборудования), но не реже одного раза за 12 лет. В ходе проверки проверяют реальное расположение искусственных и естественных элементов СУП, наличие соединений в местах пересечения продольных и поперечных искусственных элементов СУП, глубину залегания элементов СУП (если эти элементы проложены в полу или грунте), пути растекания токов с оборудования при КЗ и разряде молнии.

3. Измерение сопротивления контактных соединений между заземляемым элементом и элементом

СУП (между открытыми или сторонними проводящими частями и ГЗШ или магистральными проводниками СУП). Эти измерения следует проводить не реже чем один раз в 12 лет, а для СУП электроустановок, расположенных в особо опасных помещениях, и СУП электроустановок грузоподъемных машин и механизмов – не реже чем один раз в год. Значение сопротивления контактных соединений должно быть: не более 0,05 Ом при вводе электроустановки в эксплуатацию; не более 0,1 Ом в процессе текущей эксплуатации.

2.2 Примеры проверки состояния СУП

На рис. 1–5 приведены примеры исполнительных схем СУП некоторых энергетических и промышленных объектов.

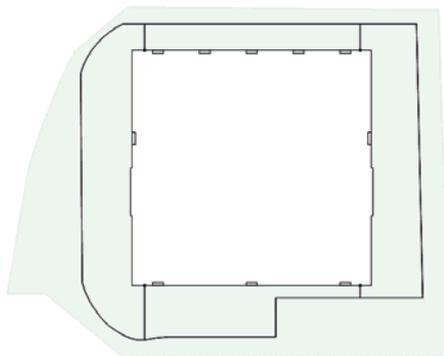
На рис. 1 приведены исполнительные схемы ЗУ и СУП одной из подстанций с закрытыми распределителями (ЗПС) 110/6 кВ Донецкоблэнерго. Рис. 1, а представляет собой исполнительную схему искусственных заземлителей ЗУ указанной подстанции и является единственным рисунком, передаваемым Заказчику в том случае, когда не выполняется проверка СУП. Если же проверка СУП входит в объем работ по проверке ЗУ, то к рис. 1, а добавится еще два рисунка – поэтажные схемы СУП. На рис. 1, б приведена схема СУП первого этажа, где расположены следующие помещения: помещение РУ-6 кВ, две камеры силовых трансформаторов, две вентиляционные камеры систем охлаждения силовых трансформаторов, два помещения трансформаторов собственных нужд (ТСН), несколько бытовых и санитарно-технических помещений. На рис. 1, в приведена схема СУП второго этажа, где расположены такие помещения: РУ-110 кВ; главный щит управления (ГЩУ), щит переменного тока собственных нужд, бытовое помещение. По периметру всех технологических помещений по стенам на высоте (0,3 – 0,7) м от пола проложены магистральные проводники СУП, выполненные из стальной полосы (40×4) мм. Эти полосы приварены к стальным колоннам строительной части здания, которые (вместе с железобетонным фундаментом здания) являются естественными заземлителями ЗУ рассматриваемой подстанции. К этим проводникам СУП приварены заземляющие проводники, присоединяющие СУП к искусственным заземлителям ЗУ. К магистралям СУП присоединены все открытые проводящие части электрооборудования (металлические оболочки (корпуса) РУ-6 кВ, ТСН и силовых трансформаторов, вентиляционного оборудования, панелей защит и управления, панелей щита переменного тока, щиты освещения, заземляющие проводники оборудования 110 кВ). Вертикальные связи между СУП первого и второго этажей осуществляют металлические и железобетонные колонны строительной части здания. Естественные заземлители ЗУ рассматриваемой подстанции представляет собой замкнутый контур, проложенный в грунте на глубине (0,6 – 0,8) м на расстоянии (2 – 7) м от стен здания. Территория, примыкающая к подстанции над ЗУ, покрыта асфальтом. Приведенная на рис. 1 подстанция представляет собой оптимальный вариант выполнения ЗУ и СУП.

Очевидно, что выполнение проверки только ЗУ

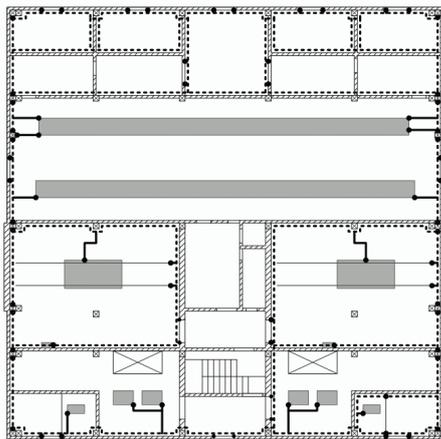
или только СУП дает неполное представление о рассматриваемом объекте, поэтому целесообразно проверки ЗУ и СУП выполнять одновременно силами одной и той же группы специалистов.

На рис. 2 приведены исполнительные схемы ЗУ и СУП одной из заводских подстанций г. Запорожье. Для паспорта на ЗУ рассматриваемой подстанции Заказчику предоставлены как отдельные исполнительные схемы ЗУ подстанции, СУП ЗРУ-150 кВ и СУП ЗРУ-6 кВ, так и совмещенная схема ЗУ и систем уравнивания потенциалов.

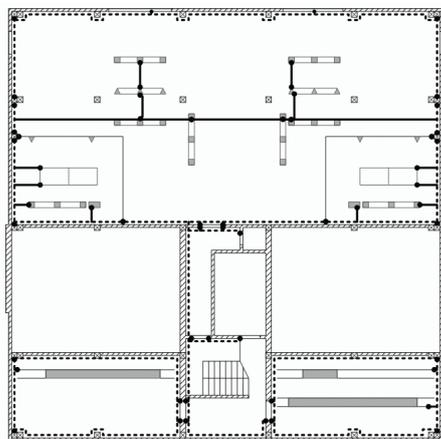
На рис. 2, а показано внешнее ЗУ вместе с СУП ЗРУ-150 кВ и СУП ЗРУ-6 кВ.



а

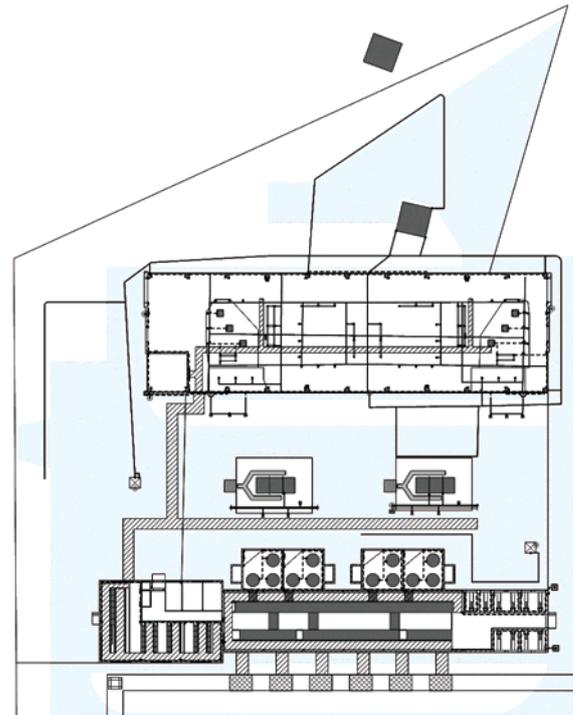


б

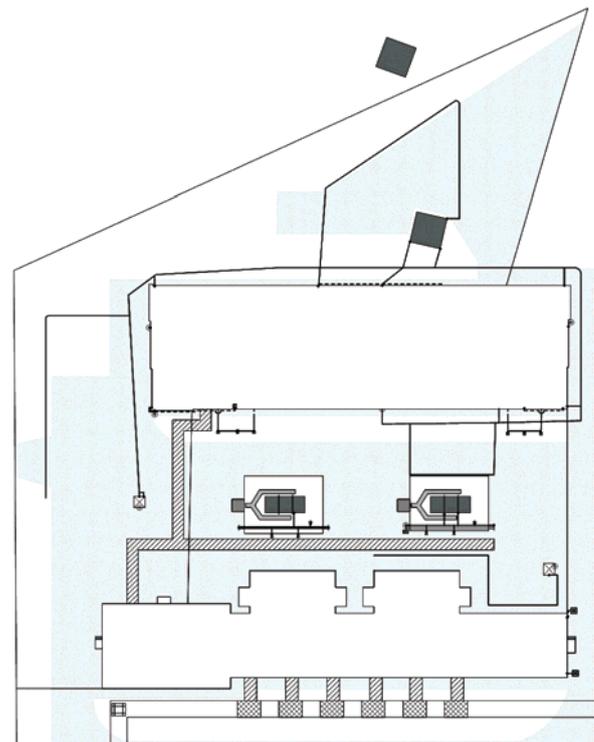


в

Рисунок 1 – Заземляющее устройство и система уравнивания потенциалов ЗПС-110/6 кВ: а - внешнее ЗУ; б – СУП этажа 1; в - СУП этажа 2



а



б

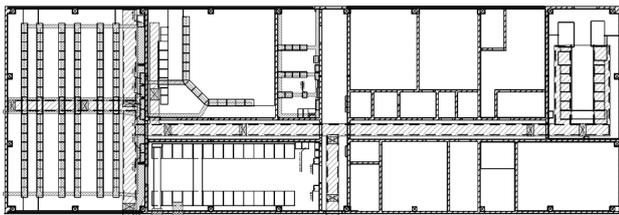
Рисунок 2 – Заземляющее устройство и система уравнивания потенциалов ПС-150/6 кВ: а – внешнее ЗУ вместе с СУП ЗРУ-150 кВ и СУП ЗРУ-6 кВ; б – внешнее ЗУ без СУП ЗРУ-150 кВ и СУП ЗРУ-6 кВ

В верхней части рисунка изображено здание ЗРУ-150 кВ, оборудование которого присоединено к магистралям СУП, проложенным под бетонной стяжкой в полу здания. По стенам здания на высоте около 0,5 м от пола проложена магистраль СУП, которая в восьми местах соединена с магистралями СУП, проложенными в полу. В одном из таких мест обнаружен

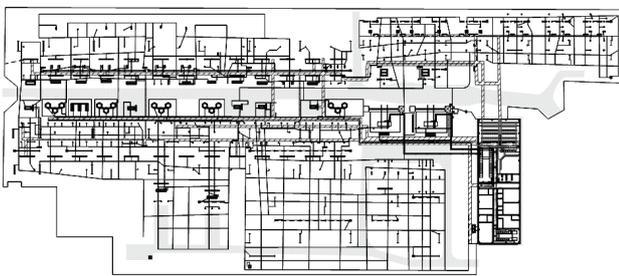
обрыв на переходе воздух – бетон вследствие коррозионного износа.

В нижней части рис. 2, а изображено здание ЗРУ-6 кВ, в котором, кроме того, расположены четыре камеры реакторов, шесть помещений ДГР и ТСН, ГЩУ, а также бытовые и санитарно-технические помещения. По стенам каждого технологического помещения этого здания проложены магистрали СУП. Магистрали СУП присоединены к закладным деталям железобетонных колонн строительной части здания только в помещениях реакторов, а в других помещениях такие связи отсутствуют.

На рис. 2, б показано только внешнее ЗУ. Этот рисунок позволит оценить только связи между зданиями ЗРУ-150 кВ и ЗРУ-6 кВ, а также силовыми трансформаторами, установленными на открытой части. Из рисунка видно, что силовые трансформаторы не имеют связи по заземлителям с системами уравнивания потенциалов зданий. Внешнее ЗУ подстанции состоит из пяти отдельных частей, соединенных между собой только PEN-проводниками кабелей 0,4 кВ собственных нужд, что в случае удара молнии или короткого замыкания приведет к повреждению этих кабелей.



а



б

Рисунок 3 – Заземляющее устройство и система уравнивания потенциалов ОРУ-150 кВ: а – СУП здания БВС; б – СУП здания БВС и ЗУ ОРУ-150 кВ

На рис. 3 приведены исполнительные схемы СУП здания вспомогательных сооружений (БВС) и ЗУ ОРУ-150 кВ одной из электростанций Украины. На рис. 3, а приведена только схема СУП БВС, а на рис. 3, б приведены схемы ЗУ и СУП БВС. В данном случае Заказчику предоставлены только отдельные схемы, поскольку их совмещение приводит к ухудшению читабельности схемы СУП.

На рис. 4 приведены исполнительные схемы СУП некоторых помещений и ЗУ собственной ТЭС и ПС-110/6 кВ одного из нефтехимических предприятий. В верхней части рисунка изображена ПС-110/6 кВ, расположенная на территории ТЭС. Подстанция состоит из ЗРУ-110 кВ, ЗРУ-6 кВ и открытой части, где установлены силовые трансформаторы, линейные

порталы и опоры воздушных линий. В нижней части рисунка изображен главный корпус ТЭС. Из рисунка видно, что кроме проверки ЗУ всей ТЭС, выполнялась проверка СУП только двух объектов: ЗРУ-110 кВ и распределительного устройства собственных нужд РУСН-6 кВ, расположенного на нулевой отметке главного корпуса. Заказчику предоставлены совмещенная схема ЗУ и СУП объектов, а также отдельные схемы.

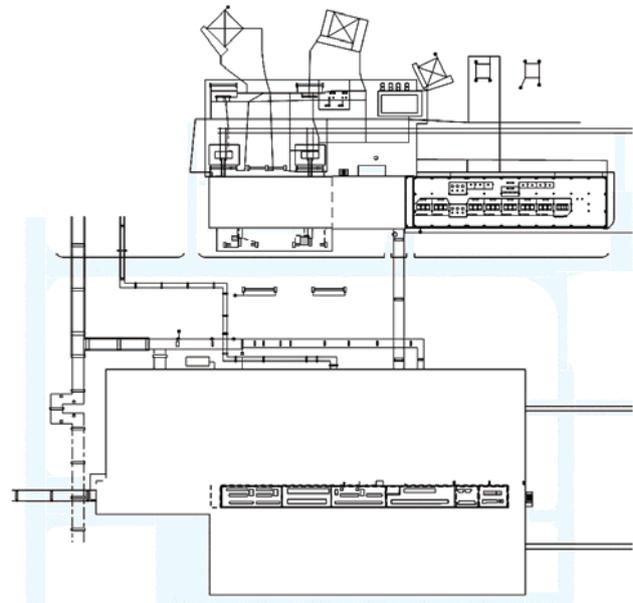
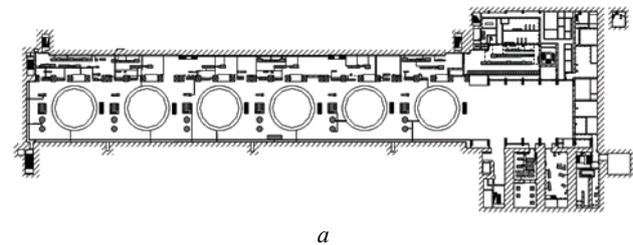
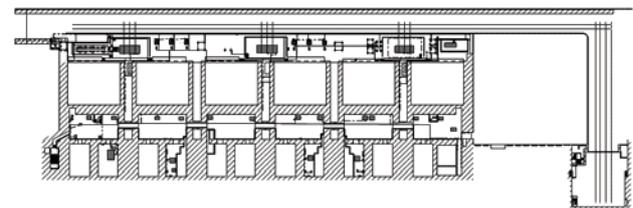


Рисунок 4 – Заземляющее устройство и система уравнивания потенциалов ТЭС и ПС-110/6 кВ Лисичанского НПЗ



а



б

Рисунок 5 – Заземляющее устройство и система уравнивания потенциалов ГЭС: а – СУП на отметке 1; б – СУП на отметке 2

На рис. 5 приведены исполнительные схемы СУП помещений, расположенных на двух отметках (уровнях) одной из ГЭС Украины. Общее количество проверяемых объектов составило 94 помещения, расположенные на 17-ти различных отметках. Общее количество проверяемого оборудования составило 1268 единиц. По результатам проведенных проверок составлены исполнительные схемы СУП и протоколы испытаний оборудования, которые вошли в состав Паспорта ЗУ рассматриваемой ГЭС.

2.3 Недостатки выполнения СУП

Опыт проведения проверок СУП промышленных и энергетических объектов позволяет сформулировать основные недостатки выполнения СУП:

- имеют место открытые проводящие части, не присоединенные к СУП;

- имеют место открытые проводящие части, присоединенные к СУП только с помощью PEN-проводника (а не PE-проводника);

- имеют место элементы СУП, не связанные между собой и не присоединенные к ЗУ;

- имеют место обрывы защитных проводников вследствие коррозии на переходе воздух – бетон (земля);

- имеют место обрывы защитных проводников оборудования с вращающимися электрическими машинами вследствие механической вибрации (чаще всего в установках приточной и вытяжной вентиляции);

- имеют место сторонние проводящие части, не присоединенные к СУП на вводе в здание.

Выводы

1. Проведение проверок систем уравнивания и выравнивания потенциалов является актуальной задачей для обеспечения электробезопасности персонала энергетических, промышленных, общественных и административных объектов.

2. Заземляющее устройство, системы уравнивания и выравнивания потенциалов гальванически соединены между собой, т.е. представляют собой единую систему обеспечения электробезопасности. Поэтому проверку состояния систем уравнивания и выравнивания потенциалов целесообразно совмещать во времени с проверкой заземляющего устройства и системы молниезащиты.

3. Проведение проверок систем уравнивания и выравнивания потенциалов позволяют своевременно выявить нарушения требований нормативных документов и разработать рекомендации по восстановлению или ремонту указанных систем.

Список литературы: 1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ:2014). - 5-те вид., переробл. й доповн. – X.: 2014 р. 2. ГОСТ 10434-82 Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования. 3. НПАОП

40.1-1.32-0 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. 4. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕП:2013). 5. СОУ 31.2-21677681-19-2009 Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. – К.: ОЕП "ГРІФРЕ", 2010. 6. МЭК 364-4-41-92 Электроустановки зданий. Часть 4 Требования по обеспечению безопасности. 41 Защита от поражения электрическим током. 7. МЭК 364-5-54-80 Электроустановки зданий. Часть 5 Выбор и монтаж электрооборудования 54 Заземляющие устройства и защитные проводники. 8. IEC 62305-1:2010 Protection against lightning – Part 1: General principles (Захист від блискавки – Частина 1: Основні принципи) (Защита от молнии – Часть 1: Основные принципы). – 72 с. 9. IEC 62305-2:2010 Protection against lightning - Part 2: Risk management (Захист від блискавки – Частина 2: Оцінка ризику) (Защита от молнии – Часть 2: Оценка риска) – 88 стр. 10. IEC 62305-3:2010 Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard (Захист від блискавки – Частина 3: Фізичне ушкодження об'єктів та загроза життю) (Защита от молнии – Часть 3: Физическое повреждение объектов и угроза жизни) – 160 с.

Bibliography (transliterated): 1. Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok (PUE:2014). 5-te vyd., pererobl. y dopovn. X.: 2014. 2. GOST 10434-82 Soedinenija kontaktne jelektricheskie. Klassifikacija. Obshhie tehnicheckie trebovanija. 3. NPAOP 40.1-1.32-0 Pravyla budovy elektroustanovok. Elektroobladnannya spetsial'nykh ustanovok. 4. Pravyla tekhnichnoyi ekspluatatsiyi elektroustanovok spozhyvachiv (PTEEP:2013). 5. SOU 31.2-21677681-19-2009 Vyprobuvannya ta kontrol' prystroyiv zazemlennya elektroustanovok. Typova instruksiya. – K.: OEP "HRIFRE", 2010. 6. MEK 364-4-41-92 Jelektroustanovki zdaniij. Chast' 4 Trebovanija po obespecheniju bezopasnosti. 41 Zashhita ot porazhenija jelektricheskim tokom. 7. MEK 364-5-54-80 Jelektroustanovki zdaniij. Chast' 5 Vyb- bor i montazh jelektrooborudovanija 54 Zazemljajushhie ustrojstva i zashhitnye provodniki. 8. IEC 62305-1:2010 Protection against lightning - Part 1: General principles (Zahist vid bliskavki – Chastina 1: Osnovni principii) (Zashhita ot molnii – Chast' 1: Osnovnye principy) 72 p. 9. IEC 62305-2:2010 Protection against lightning - Part 2: Risk management (Zahist vid bliskavki – Chastina 2: Ocinka riziku) (Zashhita ot molnii – Chast' 2: Ocenka riska) 88 p. 10. IEC 62305-3:2010 Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard (Zahist vid bliskavki – Chastina 3: Fizichne ushkodzhennja ob'ektiv ta zagroza zhittju) (Zashhita ot molnii – Chast' 3: Fizicheskoe povrezhdenie ob'ektiv i ugroza zhizni) 160 p.

Поступила (received) 23.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Глебов Олег Юрьевич – старший научный сотрудник, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» НТУ «ХПИ», тел.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Glyebov Oleg Yuriyovich – senior staff scientist, Research and Design Institute "Molniya" NTU "KhPI", tel.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Киприч Светлана Викторовна – научный сотрудник, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» НТУ «ХПИ», тел.: (057) 707-62-80; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Kiprych Svitlana Viktorivna – scientist, Research and Design Institute "Molniya" NTU "KhPI", tel.: (057) 707-62-80; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Колушко Георгий Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» НТУ «ХПИ», ведущий научный сотрудник, тел.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Koliushko Georgiy Mykchailovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior staff scientist, Research and Design Institute "Molniya" NTU "KhPI", principal scientist, tel.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Пличко Андрей Валерьевич – младший научный сотрудник, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» НТУ «ХПИ», тел.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Plichko Andrii Valeriyovich – junior scientist, Research and Design Institute "Molniya" NTU "KhPI", tel.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

УДК 621.316.933.6:622.276.6

В. Г. ЖЕКУЛ, Ю. И. МЕЛЬХЕР, С. Г. ПОКЛОНОВ, А. П. СМИРНОВ, И. С. ШВЕЦ**ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СРАБАТЫВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ РАЗРЯДНИКОВ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ПОГРУЖНЫХ УСТАНОВОК**

В работе выполнено экспериментальное исследование влияния параметров технологических режимов работы электроразрядной погружной установки (изменение частоты следования разрядов от 0,2 до 2 Гц, температуры окружающей среды от 10 °С до 90 °С, количества разрядов) на величину напряжения срабатывания его высоковольтного газонаполненного неуправляемого разрядника. Показано, что влияние указанных параметров может быть существенным и требующим введения циклических режимов работы электроразрядной погружной установки для повышения эффективности обработки скважин.

Ключевые слова: электроразрядная погружная установка, высоковольтный разрядник, температура окружающей среды, частота следования разрядов.

Введение. Эффективность работы электроразрядной погружной установки (ЭПУ), используемой для восстановления притока жидких полезных ископаемых в водозаборных и нефтяных скважинах, а также приемистости нагнетательных скважин [1-6] в значительной степени определяется неизменностью рабочих характеристик высоковольтного газонаполненного неуправляемого разрядника: уровнем напряжения срабатывания и его стабильностью.

Анализ проблемы. Ранее были выполнены исследования неуправляемого газонаполненного высоковольтного разрядника ЭПУ [7, 8]. Вопросу стабильности его работы посвящена работа [8]. В ней была показана возможность его настройки, которая обеспечивает удовлетворительное значение разброса напряжения срабатывания (порядка 2 %) в диапазоне изменения режимов работы установки. Однако расширение технологических режимов работы ЭПУ, в первую очередь связанное с варьированием частоты следования разрядов при обработке скважины от 0,2 до 2 Гц, различными температурными условиями в скважине – от 10 °С до 90 °С, необходимостью непрерывной работы в течение нескольких часов, потребовало проведения исследования важной характеристики разрядника – уровня напряжения его срабатывания. В связи с этим данная работа преследовала своей целью исследование уровня напряжения срабатывания неуправляемого газонаполненного высоковольтного разрядника ЭПУ от частоты следования разрядов, температуры окружающей среды и длительности работы ЭПУ.

Методика исследований. Настоящие исследования являются продолжением ранее выполненных работ по повышению стабильности работы высоковольтного газонаполненного неуправляемого разрядника ЭПУ, в связи с этим экспериментальное оборудование и методика проведения экспериментов являются аналогичными представленным в [8].

Для исследований использовался штатный разрядник ЭПУ. Он был предварительно настроен на рабочий режим с минимальным статистическим разбросом напряжения срабатывания, согласно методике представленной в [8]. Параметры электрической схемы и режим эксперимента были выбраны в соответст-

вии с параметрами и технологическими режимами работы ЭПУ: емкость высоковольтного конденсатора $C = 2 \cdot 10^{-6}$ Ф, частота следования разрядных импульсов – от 0,2 до 2 Гц, нагрузка – водный межэлектродный промежуток оптимальной длины по амплитуде волны давления реальной электродной системы установки [9].

Температура окружающей водной среды разрядника изменялась в диапазоне от 10 °С до 90 °С. Для ее измерения и контроля на корпусе разрядника были помещена термopара типа НУТР-105, для измерения использовался мультиметр МУ 60 (диапазон измерения температуры от –20°С до 1000°С, цена деления – 1 °С, точность ±1,0 %).

Для визуальной оценки уровня рабочего напряжения и настройки емкостного делителя напряжения использовался киловольтметр типа С-196. В ходе проведения эксперимента (в динамическом режиме) измерения проводились с помощью омического делителя напряжения (коэффициент деления – 3783) и цифрового осциллографа типа TDS-2024В.

Сравнение режимов работы разрядника на разных частотах следования разрядов осуществлялось при одинаковом общем количестве разрядов. Для удобства их статистическая обработка осуществлялась поочередно – поочередно обрабатывались блоки (диапазоны) из 50 последовательно идущих разрядов, находилось среднестатистическое значение напряжения срабатывания и среднеквадратическое отклонение данных (разброс) [10].

Общий вид эпюры напряжений срабатывания разрядника в порядке следования разрядов одного блока представлен на рис. 1.

Исследования уровня напряжения срабатывания разрядника в зависимости от температуры корпуса. Результаты экспериментальных исследований влияния температуры окружающей среды на напряжение срабатывания разрядника показали, что при повышении температуры корпуса от 10 до 90 °С для всех режимов, характеризующихся различными частотами следования разрядов, наблюдается увеличение напряжения срабатывания. Величина увеличения напряжения срабатывания разрядника находится в диапазоне от 700 до 1000 В.

В ходе проведения исследований был отмечен

факт спонтанных выбросов напряжения срабатывания разрядника как в большую, так и в меньшую сторону при температуре окружающей среды 10°C (см. рис. 1, крив. 10°C).

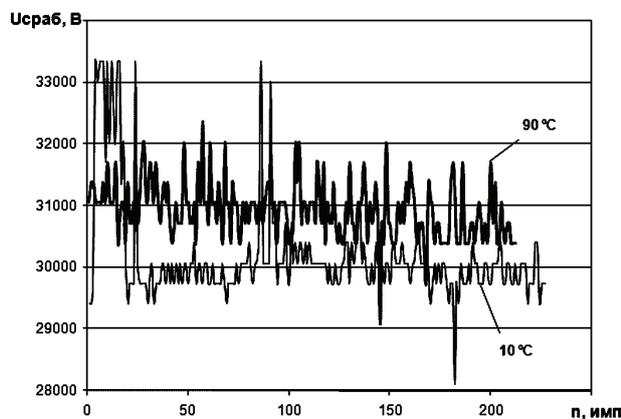


Рисунок 1 – Эпюры напряжений срабатывания разрядника при 10°C и 90°C , частота следования разрядов – $0,25\text{ Гц}$

Подобное явление описано в [11]. Однако оно не связывалось с температурой работы разрядника, а было интерпретировано как следствие загрязнения разрядника продуктами эрозии электродов. Подобное явление присутствует при всяком первоначальном включении разрядника независимо от температуры и может составлять до 12 % от напряжения срабатывания. Действительно, наблюдаемые в наших исследованиях выбросы составляли от 10 до 12 % от напряжения срабатывания разрядника.

Исследования уровня напряжения срабатывания разрядника в зависимости от частоты следования разрядов. Как уже было отмечено ранее, методика проведения данных экспериментальных исследований подразумевает сравнение характеристик разряда (уровня напряжения, разброса) различных, по частоте следования, режимов при условии равного количества реализованных в режимах разрядов. Такой подход обусловлен технологическими особенностями использования ЭПУ: при обработке скважин главную роль играет суммарное силовое воздействие на объект обработки, которое зависит от количества осуществленных разрядов независимо от частоты их следования. При этом важно, чтобы в этот период времени (как по его завершению, так и в процессе обработки) рабочие характеристики всех элементов установки, в том числе и разрядника, не выходили за некоторые допустимые пределы.

Исходя из вышесказанного, в результате статистической обработки, полученных в ходе экспериментальных исследований данных, были определены семейства кривых, определяющих поведение напряжения срабатывания разрядника при увеличении числа произведенных разрядов. Характерные зависимости напряжений срабатывания разрядника от числа разрядов при частоте следования разрядов – 1 Гц , для различных температур окружающей среды приведены на рис. 2.

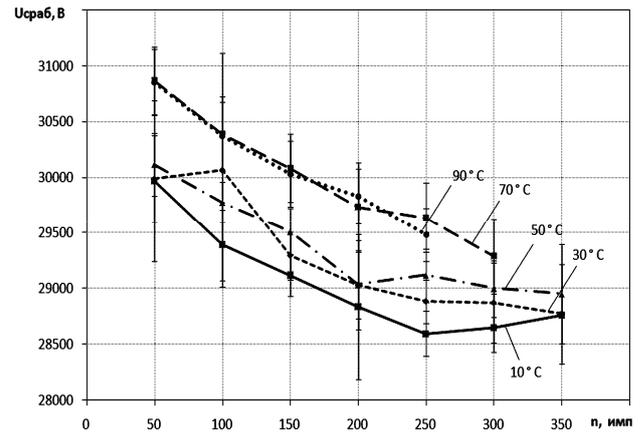


Рисунок 2 – Зависимости напряжений срабатывания разрядника от количества разрядов, при частоте следования разрядов – 1 Гц , для различных температур окружающей жидкой среды

Как следует из рис. 2 зависимости демонстрируют монотонное уменьшение напряжения срабатывания разрядника по мере увеличения количества последовательно совершаемых разрядов (диапазонов) и наличием участков насыщения. При этом следует отметить, что статистический разброс данных в пределах диапазона исследований остается приблизительно на одном уровне, что и было отмечено в [8]. Попытка статистически обработать все диапазоны каждой зависимости как единый массив приводило к искажению результатов, поскольку давало существенное увеличение величины разброса. Это объясняется тем, что систематическая ошибка, возникающая от свойства объекта статистического наблюдения, изменяться в зависимости от числа произведенных разрядов (в нашем случае – уменьшаться), переводится таким расчетом в разряд случайных [10].

Обсуждение результатов. Все полученные в ходе проведения экспериментальных исследований результаты представлены на рис. 3-5 в виде диаграммы напряжения срабатывания разрядника от:

- температуры окружающей среды $U(T)$;
- количества выполненных разрядов $U(n)$.

На рис. 3-5 жирным выделена зависимость $U(T)$, значения которой являются первыми точками при построении зависимостей $U(n)$.

Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что при частоте следования разрядов $0,25\text{ Гц}$ (номинальной для ЭПУ типа «Скиф») наблюдается слабая зависимость уровня напряжения срабатывания разрядника от температуры окружающей среды и количества выполненных разрядов. Отдельно хочется отметить, что величина напряжения срабатывания при температуре окружающей среды 10°C характеризуется завышенным средним значением и большим статистическим разбросом значений благодаря описанным ранее выбросам напряжения срабатывания (это характерно как для частоты $0,25\text{ Гц}$, так и для повышенных частот – 1 Гц и 2 Гц).

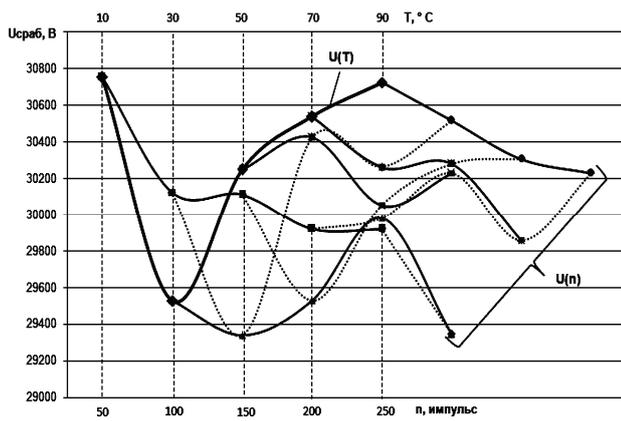


Рисунок 3 – Диаграмма напряжения срабатывания разрядника от температуры и количества разрядов при частоте следования разрядов – 0,25 Гц

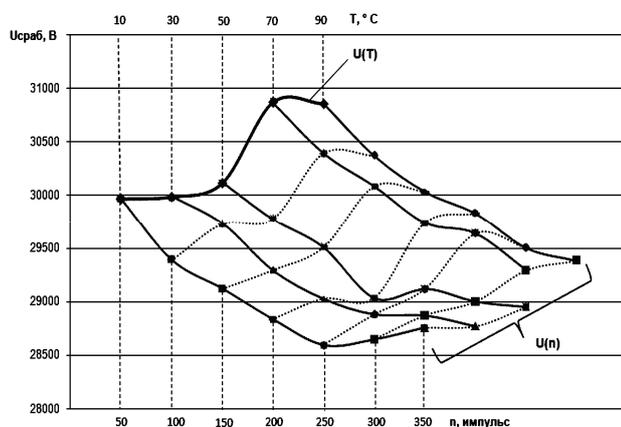


Рисунок 4 – Диаграмма напряжения срабатывания разрядника от температуры и количества разрядов при частоте следования разрядов – 1 Гц

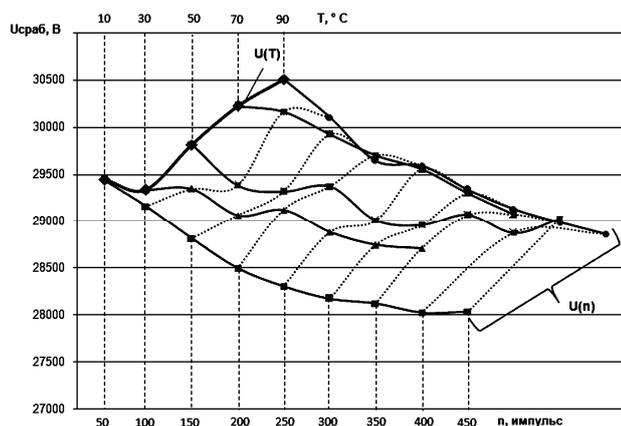


Рисунок 5 – Диаграмма напряжения срабатывания разрядника от температуры и количества разрядов при частоте следования разрядов – 2 Гц

Повышение частоты следования разрядов в 4 раза (от 0,25 до 1 Гц) существенно меняет картину распределения кривых на диаграмме (см. рис. 4). Это проявляется в росте среднего уровня напряжения срабатывания разрядника с повышением температуры окружающей среды (до $\approx 3,5\%$ при повышении температуры от 10 и 90 °C на 50 первых разрядах) и последующем его падении с увеличением числа произведенных разрядов (до 5 % после 300 последовательно

произведенных разрядов). Идентичная картина наблюдается и при частоте 2 Гц (рис. 5). Все это позволяет утверждать, что в случае работы разрядника на частотах 1 Гц, 2 Гц для обеспечения эффективной обработки скважин необходимо учитывать как температуру окружающей среды, так и количество выполненных разрядов. Одним из способов позволяющих достичь этого видится в обеспечении циклических режимов работы ЭПУ – «обработка-отдых». Это обеспечивало бы полное восстановление параметров газовой среды, заполняющей разрядник (цикл «отдых») и работу разрядника на максимальном уровне напряжения срабатывания (цикл «обработка»). Однако, для получения и обоснования эффективных временных параметров таких режимов работы ЭПУ необходимо проведение дополнительных исследований.

Выводы. Результаты проведенных исследований показали, что при работе высоковольтного газонаполненного неуправляемого разрядника на частотах следования импульсов 1 Гц и 2 Гц с повышением температуры окружающей среды происходит рост среднего уровня напряжения срабатывания, который постепенно снижается с увеличением количества выполненных разрядов. Все это свидетельствует о необходимости использования циклических технологических режимов работы ЭПУ для обеспечения эффективной обработки скважин.

Список литературы: 1. *Максутов Р. А.* Использование электроразрядного воздействия на призабойную зону / *Р. А. Максутов, О. Н. Сизоненко, П. П. Малюшевский* // Нефтяное хозяйство. – 1985. – № 1. – С. 34-35. 2. *Жекул В. Г.* Электроразрядная обработка скважин на нефтедобывающих месторождениях Украины / *В. Г. Жекул, В. А. Кучернюк, Ю. И. Мельхер и др.* // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2012. – Вып. 21. – С. 72-77. 3. *Shvets I.S.* Application of elektroimplosion for well stimulation / *I.S. Shvets, O.N. Sezonenko, R.A. Macsutov* // Proceedings volume 1:7 the European Symposium on Improved oil Recovery, 27-29 October, 1993, Moscow, Russia. 4. *Shvets I.S.* Elektrohydroimpulse equipment for Increase of Oil and Intake Wells / *I.S. Shvets, Y.I. Kurashko, N.N. Klimanskiy and others* // 13th International Simposium on High Current Electronics: Proceedings. – Tomsk: Publishing house of the IAO SBRAS, 2004. – P. 409-411. 5. *Dubovenko K. V.* Power supplies for compact submerged high voltage equipment / *K. V. Dubovenko, Yu. I. Kurashko, I. S. Shvets* // Abstraks of the IEEE Intl Pulsed Modulator Conf. (PMC'2002). Report PA55. – Hollywood, California, USA, 2002. – P. 73. 6. *Dubovenko K. V.* Equipment developed at IPRE for well stimulation in the process of oil and water production / *K. V. Dubovenko, Yu. I. Kurashko, L. I. Onyshchenro and others* // IEEE Intl Pulsed Power Plasma Science 2001, Conf. Digest of Technical Papers. – Las Vegas, Nevada, USA, 2002. – 2. – P.1070-1073. 7. *Dubovenko K. V.* The design, fabrication and testing of a closing switch for compact electrical discharge industrial equipment / *K. V. Dubovenko, Yu. I. Kurashko* // 11th IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Technical Papers. – Baltimore, Maryland, USA, 1997. – 2. – P. 868-874. 8. *Жекул В. Г.* Исследования стабильности работы высоковольтных газонаполненных неуправляемых разрядников погружных установок / *В. Г. Жекул, Ю.И. Мельхер, С. Г. Поклонов и др.* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика

високих напруг. – 2014. – № 21 (1064). – С. 23-31. **9.** Жекул В.Г. Электроразрядные погружные установки со стабилизированными рабочими параметрами / В. Г. Жекул, С. Г. Поклонов, И. С. Швец // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 2. – С. 89-91. **10.** Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин / А. Н. Зайдель. – Л.: Наука, 1985. – 112 с. **11.** Киселев Ю.В. Искровые разрядники / Ю. В. Киселев, В. П. Черепанов – М.: Советское радио, серия «Элементы радиоэлектронной аппаратуры», 1976. – 72 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Maksutov R. A., O. N. Sizonenko and P. P. Maljushevskij. Ispol'zovanie jelektrozrazjadnogo vozdejstvija na prizabojnuju zonu. Neftjanoe hozjajstvo. No 1. 1985. 34-35. Print. **2.** Zhekul V. G., et al. Jelektrozrazjadnaja obrabotka skvazhin na neftedobyvajushhih mestorozhdenijah Ukrainy. Vestnik NTU «KhPI». No 21. 2012. 72-77. Print. **3.** Shvets I.S., O.N. Sezonenko and R.A. Macsutov Application of elektroimplosion for well stimulation. Proceedings volume 1:7 the European Symposium on Improved oil Recovery, 27-29 October, 1993, Moscow, Russia. **4.** Shvets I.S. et al. Elektrohydroimpulse equipment for Increase of Oil and Intake Wells. 13th International Simposium on High Current Electronics: Proceedings. Tomsk:Publishing house of the IAO

SBRAS. 2004. 409-411. **5.** Dubovenko K. V., Kurashko Yu. I. and Shvets I. S. Power supplies for compact submerged high voltage equipment. Abstracts of the IEEE Intl Pulsed Modulator Conf. (PMC'2002). Report PA55. Hollywood, California, USA, 2002. P.73. **6.** Dubovenko K. V. et al. Equipment developed at IPRE for well stimulation in the process of oil and water production. IEEE Intl Pulsed Power Plasma Science 2001, Conf. Digest of Technical Papers. Las Vegas, Nevada, USA. 2002. 2. P.1070-1073. **7.** Dubovenko K. V., Kurashko Yu. I. The design, fabrication and testing of a closing switch for compact electrical discharge industrial equipment. 11th IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Technical Papers. Baltimore, Maryland, USA. 1997. 2. P. 868-874. **8.** Zhekul V. G., et al. Issledovanija stabil'nosti raboty vysokovol'tnyh gazonapolnennyh neupravljaemyh razrjadnikov pogruzhnyh ustanovok. Vestnik NTU «KhPI». No 21. 2014. 23-31. Print. **9.** Zhekul V.G., S. G. Poklonov and I. S. Shvec Jelektrozrazjadnye pogruzhnye ustanovki so stabilizirovannymi rabochimi parametrami. Neftjanoe hozjajstvo. No 2. 2006. 89-91. Print. **10.** Zajdel' A.N. Pogreshnosti izmerenij fizicheskikh velichin. Leningrad: Nauka, 1985. **11.** Kiselev Ju. V. and V. P. Cherepanov Iskrovyje razrjadniki. Moskva: Sovetskoe radio, 1976.

Поступила (received) 12.02.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Жекул Василь Григорьевич – кандидат технічних наук, старший научний співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України (ІІПТ НАНУ), Николаев, e-mail: v_zhekul@mail.ru

Zhekul Vasilij Grigoryevich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: v_zhekul@mail.ru

Мельхер Юрій Іванович – молодший научний співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України (ІІПТ НАНУ), Николаев, e-mail: u19melkher@rambler.ru

Melkher Iurii Ivanovich – Junior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: u19melkher@rambler.ru

Поклонов Сергей Георгиевич – кандидат технічних наук, старший научний співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України (ІІПТ НАНУ), Николаев, e-mail: sergeypoklonov@mail.ru

Poklonov Sergey Georgievich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: sergeypoklonov@mail.ru

Смирнов Алексей Петрович – кандидат технічних наук, старший научний співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України (ІІПТ НАНУ), Николаев, e-mail: aps-78@mail.ru

Smirnov Oleksiy Petrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: aps-78@mail.ru

Швец Иван Сафронович – кандидат фізико-математических наук, виконуючий обов'язки завідуючого відділу, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України (ІІПТ НАНУ), Николаев, e-mail: iipt@iipt.com.ua

Shvets Ivan Safronovych – Candidate of Physics and Mathematics (Ph.D), Head of Department, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: iipt@iipt.com.ua

УДК 53.084.4:537.528

В. Г. ЖЕКУЛ, С. Г. ПОКЛОНОВ, А. П. СМИРНОВ, В. С. МАКАРЕНКО**КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНОМ РАЗРЯДЕ В ЖИДКОСТИ**

В работе предложена комплексная методика калибровки средств измерения электрических процессов (длительностью от 10 мкс до 100 мкс, амплитудное значение разрядного тока 10^4 - 10^5 А, зарядное напряжение десятки киловольт) при электрическом разряде в жидкости. Она позволяет выполнить калибровку и проверку средств измерения на режимах близких по своим параметрам к измеряемым в процессе проведения экспериментальных работ, снизить вероятность ошибки, уменьшить погрешность процесса калибровки, а также периодически осуществлять проверку коэффициента уже поверенных средств измерения непосредственно в процессе проведения экспериментальных исследований.

Ключевые слова: высоковольтный разряд в жидкости, разрядный ток, напряжение на разрядном промежутке, коаксиальный омический шунт, делитель напряжения, катушка Роговского.

Введение. Электроразрядные технологии успешно применяются в различных отраслях промышленности: от машиностроения и химической промышленности до пищевой и нефтегазодобывающей [1, 2]. Успешность применения высоковольтного электрического разряда в жидкости для нужд промышленности дает нам повод говорить об актуальности работ, которые направлены на расширение границ области его применения и повышения эффективности уже существующих электроразрядных технологий. Выполнение этих работ невозможно без проведения научных исследований, одним из методов которых является физическое моделирование, с измерением электрических характеристик разряда: разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке. По их виду и последующему анализу можно судить о протекании процесса и его эффективности. Все это говорит о важности корректного подхода к постановке физического эксперимента, выбору и калибровке средств измерения.

Постановка задачи. На выбор средств измерения при электрическом разряде в жидкости накладывает свои ограничения специфика измеряемого импульса напряжения и тока: малая длительность (десятки микросекунд) и высокие амплитудные значения (десятки килоампер и десятки киловольт).

Учитывая вышеизложенные требования для измерения импульсных токов большой амплитуды (от 10^4 до 10^5) А используются различного рода зонды [3-5]: токовые шунты различной конструкции, индукционные катушки – катушка (пояс) Роговского, датчики Холла и т.д. В качестве зондов для измерения высоких импульсных напряжений в электроразрядных установках различного назначения используются, как правило, различного рода делители напряжения (емкостные, омические, смешанные и т.д.) [3, 6, 7].

Проведенный анализ показал, что для измерения импульсных токов и напряжений при экспериментальных исследованиях электрического разряда наиболее широкое применение получили катушка Роговского и резистивный шунт, а также емкостной делитель напряжения [8-11].

Исследования рынка производителей средств высоковольтных измерений показало, что существуют фирмы, которые занимаются их серийным производ-

ством [12-13]. Однако специфика научных исследований зачастую подразумевает необходимость разработки измерительного оборудования с индивидуальными массогабаритными показателями и необходимым для данных измерений коэффициентом трансформации исследуемого сигнала, которые часто отличаются от серийно выпускаемых моделей. И если их изготовление, при наличии соответствующих навыков, знаний и необходимых комплектующих, не представляет серьезных затруднений [3], то процесс калибровки вызывает некоторую сложность. Особенно если учесть, что калибровка должна осуществляться при параметрах близких к характеристикам измеряемого импульса.

В ряде литературных источников описано несколько методик по калибровке катушки Роговского, резистивного шунта и делителя напряжения. Так в [5] калибровка шунта проводилась с помощью генератора аperiodических импульсов ГАИ-2 и калиброванной катушкой Роговского. Авторами работы [14] для калибровки катушки Роговского использовался низковольтный генератор импульсных токов. В работе [15] описаны основные моменты калибровки промышленно изготавливаемых катушек Роговского:

- катушку Роговского необходимо калибровать вместе с его интегратором;
- с учетом высокой линейности характеристик пояса калибровку можно производить лишь в одной точке при фиксированном значении параметров тока (амплитуды и частоты);
- желателен индивидуальный подход к калибровке катушек Роговского.

В [4] предлагается для определения коэффициента делителя использовать единичные импульсы с известными параметрами, а для калибровки шунта – квазипрямоугольные импульсы тока, получаемые путем разряда конденсатора на контур с нужным активным сопротивлением.

Также существует несколько патентов (одним из примеров может служить [16]) в которых описана калибровка шунтов и катушек Роговского. Для калибровки измерительного оборудования могут быть применены промышленные калибраторы [17]. Для калибровки могут быть использованы также серийно выпускаемые сертифицированные измерители тока и напряжения [12-13].

Таким образом, анализ показал, что в литературе отсутствует подробное описание комплексной методики калибровки средств измерения электрических процессов при высоковольтном разряде в жидкости с параметрами, близкими к характеристикам измеряемого импульса без использования калибраторов или других образцовых приборов. При этом определено, что она должна включать в себя не только несколько методов калибровки, для уменьшения вероятности ошибки при определении коэффициента, но и, одновременно, осуществлять проверку работоспособности средств измерения при исследуемых параметрах. Другим немаловажным свойством этой методики должна быть возможность ее осуществления только средствами исследовательской лаборатории, которые впоследствии будут использованы при проведении экспериментальных исследований. Это уменьшит материальные и временные затраты на калибровку, а также позволит периодически осуществлять проверку коэффициента уже поверенных средств измерения или калибровать, в случае необходимости, новые не прерывая процесс проведения экспериментальных исследований.

Учитывая все вышесказанное, в данной работе была поставлена цель, на основании уже известных методов, создать комплексную методику калибровки и проверки высоковольтных средств измерения электрических процессов длительностью \approx от 10 мкс до 100 мкс, в случае высоковольтного разряда в жидкости, которую можно осуществить только средствами экспериментальной высоковольтной лаборатории.

Калибровка средств измерения разрядного тока. Как уже было сказано выше, для измерения разрядного тока при электрическом разряде в жидкости могут быть использованы катушка Роговского и омический коаксиальный шунт (внешний вид используемых в работе средств измерения представлен на рис. 1 и рис. 2). Причем в процессе измерения желательно использовать оба измерительных прибора, что позволит оперативно отреагировать на потерю работоспособности одного из них.

Для повышения точности их калибровки, уменьшения погрешности измерения и проверки их работоспособности предлагается использовать два метода: экспериментальный и расчетный.

Калибровку предлагается проводить на режиме короткого замыкания (КЗ), когда разрядный промежуток в электродной системе закорочен металлическим проводником большого сечения. В этом случае разрядная цепь установки представляет собой классический RLC разрядный контур, разрядные характеристики которого легко и точно можно рассчитать по исходным параметрам [18].

В дальнейшем калибруемые средства измерения планируется использовать в исследованиях по повышению эффективности электроразрядного способа декольматации. Поэтому параметры разрядной цепи при калибровке должны соответствовать параметрам электроразрядного скважинного устройства «Скиф»: величина зарядного напряжения $U_z = 30$ кВ, емкость конденсаторной батареи $C = 2,26$ мкФ [19-22].



Рисунок 1 – Внешний вид катушки Роговского



Рисунок 2 – Внешний вид омического коаксиального шунта

Экспериментальный метод калибровки средств измерения разрядного тока. Сущность экспериментального метода калибровки состояла из двух шагов и заключалась в следующем.

На первом шаге калибровки с помощью образцового моста постоянного тока МО62 ГОСТ 7165-93 измерялось сопротивление шунта. В результате проведенных измерений было определено сопротивление шунта используемого в данной работе, которое составляло $R_{ш} = 0,00564 (\pm 0,5 \%)$ Ом.

На втором шаге выполнялось осциллографирование разрядного тока на режиме КЗ. На рис. 3 представлена полученная осциллограмма.

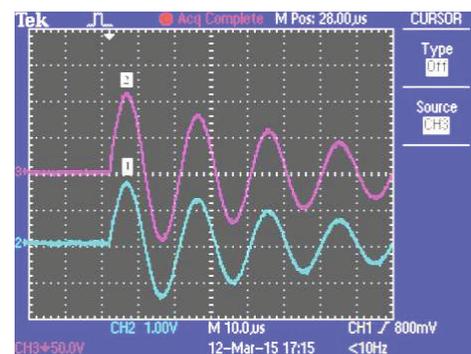


Рисунок 3 – Осциллограмма режима короткого замыкания:

1 – ток в разрядной цепи, измеренный с помощью пояса Роговского; 2 – ток в разрядной цепи, измеренный с помощью омического коаксиального шунта

В процессе обработки полученных осциллограмм была определена величина первой амплитуды тока как для случая измерения с помощью шунта ($U_{ш}$), так и для случая измерения катушкой Роговского ($U_{р}$). Затем используя выражения (1) определяли истинное значение тока, а по (2) – коэффициент катушки Роговского (K_p). Аналогично находится и коэффициент шунта ($K_{ш}$).

$$I = U_{ш} / R_{ш}, \quad (1)$$

где I – истинное значение разрядного тока, А; $U_{ш}$ – напряжение на шунте, В; $R_{ш}$ – сопротивление шунта, Ом.

$$K_p = I/U_{ш}, \quad (2)$$

где $U_{п}$ – напряжение сигнала, полученного с помощью катушки Роговского, В.

Все полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерений

$U_{ш}, В$	$U_{п}, В$	$I, А$	$K_{ш}, А/В$	$K_p, А/В$
108	1,68	19148,936	177,3	11398,18

Расчетный метод калибровки средств измерения разрядного тока. Для проверки точности калибровки, наряду с экспериментальной методикой, необходимо использовать расчетный (теоретический) метод, который позволяет по известным параметрам разрядной цепи и измеренному с помощью измерительных средств временного профиля тока КЗ рассчитать любую по порядку следования амплитуду затухающих колебаний разрядного тока.

При расчете полагали, что разрядная цепь представляет собой классический RLC-контур [18]. С помощью полученной осциллограммы тока КЗ (рис. 3) определяли период колебаний T и декремент затухания Δ ($\Delta=I/I_3$). Используя эти данные и известные соотношения для RLC-контра (3-4) можно определить сопротивление R и индуктивность L разрядного контура.

$$T = 2\pi \sqrt{LC}; \quad (3)$$

$$L = \frac{T^2}{4\pi^2 C}. \quad (4)$$

Зная, что для RLC-контра $\alpha = R/2L$ и $\alpha = \ln \Delta/T$, приравниваем правые части

$$R/2L = \ln \Delta/T \quad (5)$$

можем определить сопротивление контура (сопротивление разрядной цепи экспериментальной установки в режиме КЗ)

$$R = \frac{2L \ln \Delta}{T}. \quad (6)$$

Все параметры разрядного контура экспериментального стенда приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Параметры разрядного контура экспериментального стенда

U_3	C	T	L	R
кВ	мкФ	мкс	мкГн	Ом
30,0	2,26	19,52	4,288	0,154

Зная R и зарядное напряжение (U_3) можно определить реальное значение первой амплитуды тока используя известные формулы для RLC цепи

$$I_{1r} = \frac{U_3}{L\omega} e^{-\alpha t_1}, \quad (7)$$

где t_1 – время на осциллограмме амплитуды первого максимума тока; $\alpha = R/2L$; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$; $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$.

Полученное по выражению (7) значение амплитуды первого максимума тока КЗ – 19970 А.

Расчетные коэффициенты катушки Роговского –

11886,905 А/В, шунта - 184,9 А/В.

В ходе калибровки было получено хорошее совпадение результатов, полученных с использованием двух методик – расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет 4,11 %.

При проведении экспериментальных исследований в качестве основного необходимо брать расчетный коэффициент, так как он не содержит погрешность, связанную с использованием дополнительных средств измерения.

Калибровка делителя напряжения. Как показал предварительный анализ, лучшим вариантом для измерения напряжения на разрядном промежутке при электрическом разряде в воде является делитель напряжения. При выполнении данной работы, с учетом плана проведения экспериментальных работ и ожидаемых параметров измеряемого сигнала, был разработан и создан емкостной делитель, внешний вид которого приведен на рис. 4. Делитель напряжения был создан по схеме, представленной в [3], и помещен в керамический корпус резистора КЭВ-40.

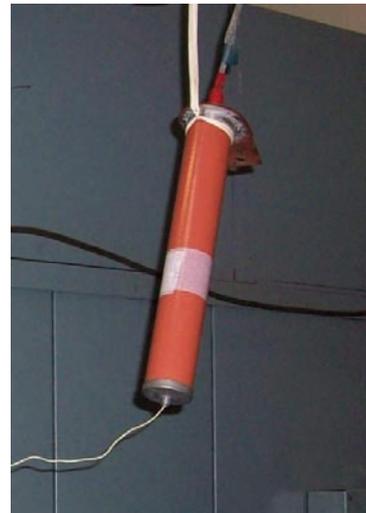


Рисунок 4 – Внешний вид емкостного делителя напряжения

Для проверки работоспособности и калибровки созданного делителя напряжения было принято решение также использовать два метода.

В основе первого метода лежит использование импульсов низкого напряжения для отладки, в процессе разработки и создания делителя, а также для последующей калибровки. Для этого использовался генератор прямоугольных импульсов (типа Г 5-63). Он генерирует импульсы низкого напряжения (до 60 В), длительность которых может варьироваться в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-3} с. При калибровке делителя импульсом с длительностью, равной длительности разряда, подбором согласующих элементов делителя добиваются полного повторения формы импульса на данной частоте, после чего определяется коэффициент деления делителя. На рис. 5 представлен пример калибровки делителя напряжения прямоугольным импульсом длительностью 10 мкс. Данные процесса калибровки занесены в табл. 3.

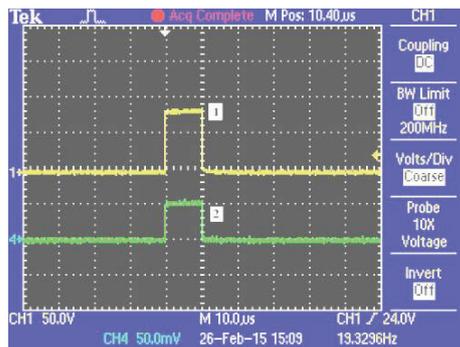


Рисунок 5 – Пример калибровки делителя прямоугольным импульсом низкого напряжения длительностью 10 мкс:
1 – прямой сигнал с генератора, 2 – сигнал через делитель напряжения

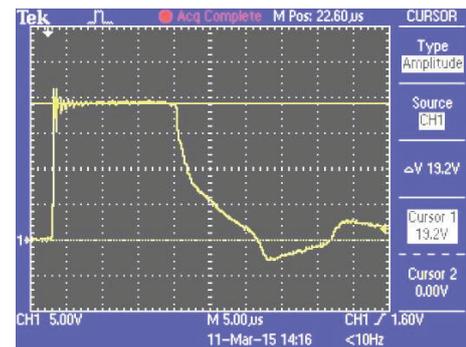


Рисунок 6 – Калибровка делителя высоким напряжением

Таблица 3 – Данные процесса калибровки

Сигнал генератора		Сигнал через делитель напряжения		
Ампл. U, В	Длит. τ, мкс	Ампл. U, В	Длит. τ, мкс	Коефф. делит (Кд)
84	от 10 до 100	0,05	от 10 до 100	1680

Данный метод применяется с целью проверки возможности использования разработанного делителя напряжения для измерения сигнала длительностью от 10 мкс до 100 мкс и предварительной калибровки. Результаты исследования показали, что коэффициент делителя напряжения остается неизменным во всем рассматриваемом временном диапазоне. Однако, так как для калибровки использовались низковольтные импульсные сигналы, а созданный делитель напряжения предназначен для измерения высоковольтных импульсов напряжения, то его коэффициент деления должен быть уточнен. Для этого используется *второй метод калибровки*.

Его сущность заключается в определении коэффициента делителя на высоковольтном напряжении путем осциллографирования напряжения на разрядном промежутке при режимах с большим временем задержки до пробоя. Для этого осуществляют разряд с большим межэлектродным промежутком (до 50 мм) в слабопроводящей среде. При таком режиме разряда в предпробойной стадии разряда напряжение на зарядном промежутке равно зарядному напряжению на конденсаторе, затем происходит пробой и резкое падение напряжения. Импульс напряжения при этом близкий к прямоугольному. На рис. 6 приведена осциллограмма данного метода калибровки при пробое высоким напряжением 30 кВ.

Для осуществления разряда используется управляемый разрядник–коммутатор. Зарядное напряжение на конденсаторе регистрируется специальным электростатическим киловольтметром с погрешностью не более 1 % и сравнивается со значением полученном на осциллограмме.

По полученной осциллограмме определяется величина сигнала соответствующая «полке» задержки пробоя ($U_{н0}$), а зная величину зарядного напряжения легко определить коэффициент делителя используя выражение (8)

$$K_d = U_3 / U_{н0}$$

Согласно данным, приведенным на рис. 6 коэффициент делителя напряжения, при работе на высоком напряжении составляет 1562,5. Различие с коэффициентом делителя напряжения, полученного при низком напряжении, составляет $\approx 7\%$. При выполнении экспериментальных работ необходимо брать значение коэффициента делителя, полученное на высоком напряжении.

Выводы. В данной работе предложена комплексная методика калибровки средств измерения электрических процессов, разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке, при электрическом разряде в жидкости. Она позволяет выполнить калибровку и проверку средств измерения, снизить вероятность ошибки и уменьшить погрешность процесса калибровки, а также периодически осуществлять проверку коэффициента уже поверенных средств измерения непосредственно в процессе проведения экспериментальных исследований. Помимо этого отмечено:

- методика калибровки измерителей тока (омического коаксиального шунта и катушки Роговского) должна осуществляться по двум методам - экспериментальному и расчетному;

- калибровка измерителя напряжения (делителя напряжения) также должна проходить в два этапа и включать в себя непосредственно калибровку на высоком напряжении и проверку корректной его работы при измерении импульсов короткой длительности.

Список литературы: 1. Гулый Г. А. Основы разрядно-импульсных технологий / Г. А. Гулый. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 2. Вовченко А. И. 50-летний путь развития: теория и практика электроразрядных процессов / А. И. Вовченко // Материалы XVI Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах» (19-22 августа 2013). – Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2013. – С. 3-6. 3. Шваб А. Измерения на высоком напряжении / А. Шваб. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с. 4. Ашнер А. М. Получение и измерение импульсных высоких напряжений / А. М. Ашнер. – М.: Энергия, 1979. – 120 с. 5. Донец С. Е. Стержневой шунт для измерения сильных токов микросекундной длительности / С. Е. Донец, В. В. Леденев, В. В. Литвиненко // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2008. – № 44. – С. 39-44. 6. Важов В. Ф. Техника высоких напряжений: курс лекций / В. Ф. Важов, В. А. Лавринович. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 150 с. 7. Куффель Е. Техника и электрофизика высоких напряжений / Е. Куффель, В. Цаенгель,

Дж. Куффель. – Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2011. – 520 с. **8.** Винников Д. В. Экспериментальное исследование электрического разряда в жидкости, создаваемого между электродами с конусной выемкой / Д. В. Винников, А. Н. Озеров, В. Б. Юферов и др. // Электротехника и электромеханика. – 2013. – № 1. – С. 55-60. **9.** Аблесимов В. Е. Измерение характеристик электрического разряда в растворе NaCl / В. Е. Аблесимов, В. М. Карюк, А. Н. Павлов и др. // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, № 3. – С. 42-44. **10.** Жекул В. Г. К теории формирования электрического разряда в проводящей жидкости / В. Г. Жекул, Г. Б. Раковский // Журнал Технической физики. – 1983. – Т. 53, № 1. – С. 8-14. **11.** Поклонов С. Г. Эффективность электрического разряда для условий нефтяных скважин / С. Г. Поклонов, В. Ж. Глушенко, Л. П. Трофимова и др. // Нефтяное хозяйство. – 1992. – №3. – С. 20-23. **12.** High Voltage Probes. Электронный ресурс: <http://www.highvoltageprobes.com/high-voltage-probes>. **13.** Stangenes Industries, Inc. Электронный ресурс: <http://www.stangenes.com>. **14.** Батыгин Ю. В. Численная обработка результатов измерения импульсных токов поясом Роговского / Ю. В. Батыгин, Г. С. Сериков, Е. А. Чаплыгин // Автомобильный транспорт. – 2009. – № 25. – С. 194-199. **15.** Ковнерев М. Использование катушки Роговского для токовых измерений / М. Ковнерев, Ю. Троцкий // Электронные компоненты. – 2005. – № 5. – С. 123-127. **16.** Баранов П. Ф. Пат. 139577. Российская Федерация. Устройство для проверки шунта / П. Ф. Баранов, Э.И. Цимбалист, В. Н. Бориков, Е. В. Бедарева. – 2014. **17.** Денисова Н. Новая эра в системе калибровки / Н. Денисова // Современная электроника. – 2011. – № 5. – С. 34-37. **18.** Теоретические основы электротехники. Т. 1. – М.: Высшая школа, 1976. – 544 с. **19.** Жекул В. Г. Электроразрядная обработка скважин на нефтедобывающих месторождениях Украины / В. Г. Жекул, В. А. Кучернюк, Ю. И. Мельхер и др. // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2012. – Вып. 21. – С. 72-77. **20.** Shwets I. S. Application of elektroimplosion for well stimulation / I. S. Shwets, O. N. Sezenenko, R. A. Macsutov // Proceedings volume 1:7 the European Symposium on Improved oil Recovery, 27-29 October, 1993, Moscow, Russia. **21.** Shwets I. S. Elektrohydroimpulse equipment for Increase of Oil and Intake Wells / I. S. Shwets, Y. I. Kurashko, N. N. Klimanskiy and others // 13th International Simposium on High Current Electronics: Proceedings. – Tomsk: Publishing house of the IAO SBRAS, 2004. – P. 409-411. **22.** Софийский К. К. Динамические способы декольматации поверхностных скважин / К. К. Софийский, П. Е. Филимонов, Б. В. Бокий и др. – Донецк: ТОВ «Східний видавничий дім», 2014. – 248 с.

References: **1.** Gulyj, G. A. Osnovy razrjadnoimpul'snyh tehnologij [Fundamentals of discharge-pulse technologies]. Kiev, Naukova dumka, 1990. 208. **2.** Vovchenko A. I. 50-letnij put' razvitija: teorija i praktika jelektrozrazjadnyh processov [The 50-year-old way of development: theory and practice of electrodischarge processes]. Fizika impul'snyh razrjadov v kondensirovannyh sredah: materialy XVI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (19-22 avgusta 2013) [Physics of Pulse Discharges in Condensed Media: The materials XVI-th International Scientific Conference (August, 19-22, 2013)]. Nikolaev, Mikolaïvs'ka oblasna drukarnja, 2013, pp. 3-6. **3.** Shvab A. Izmereniya na vysokom naprjazhenii [High-voltage measurements]. Moscow, Jenergoatomizdat, 1983. 264. **4.** Ashner A. M. Poluchenie i izmerenie impul'snyh vysokih naprjazhenij [Production and measurement of high-voltage pulses]. Moscow, Jenergiya, 1979. 120. **5.** Donec S. E., Ledenev V. V., Litvinenko V. V. Sterzhnevij shunt dlja izmereniya sil'nyh tokov mikrosekundnoj dlitel'nosti

[Rod shunt for measuring high currents of microsecond duration]. Vestnik NTU "HPI". Serija: Tehnika i jelektrofizika vysokih naprjazhenij. 2008. No. 44. P. 39-44. **6.** Vazhov V. F., Lavrinovich V. A. Tehnika vysokih naprjazhenij: kurs lekcij [High-voltage machines: course of lectures]. Tomsk, Izd-vo TPU, 2008. 150. **7.** Kuffel E., Zaengl V., Kuffel J. Tehnika i jelektrofizika vysokih naprjazhenij [High-voltage engineering and electrophysics]. Dolgoprudnyj: Izd. dom "Intellekt", 2011. 520. **8.** Vinnikov D. V., Ozerov A. N., Juferov V. B., Sakun A. V., Korytchenko K. V., Mesenko A. P. Jeksperimental'noe issledovanie jelektricheskogo razrjada v zhidkosti, sozdavaemogo mezhdru jelektrodami s konusnoj vyemkoj [Experimental investigation of electrical discharge in liquid initiated between cone channel electrodes]. Jelektrotehnika i Jelektromehanika. 2013. No 1. P. 55-60. **9.** Ablesimov V. E., Karjuk V. M., Pavlov A. N., Kirpichev A. A., Simchuk A. A. Izmerenie harakteristik jelektricheskogo razrjada v rastvore NaCl [Measurement of characteristics of an electrical discharge in NaCl solution]. Zhurnal tehniczeskoj fiziki. 2015. Vol. 85, No. 3. P. 42-44. **10.** Zhekul V. G., Rakovskij G. B. K teorii formirovaniya jelektricheskogo razrjada v provodjashhej zhidkosti [On the theory of formation of an electrical discharge in a conductive fluid]. Zhurnal Tehniczeskoj fiziki. 1983. Vol. 53. No. 1. P. 8-14. **11.** Poklonov S. G., Glushenko V. Zh., Trofimova L. P., Curkin V. N., Kovjazin N. I. Jefeektivnost' jelektricheskogo razrjada dlja uslovij neftjanykh skvazhin [Efficiency of the electric discharge for oil well conditions]. Neftjanoe hozjajstvo. 1992. No. 3. P. 20-23. **12.** High Voltage Probes. Available at: <http://www.highvoltageprobes.com/high-voltage-probes>. (accessed 21.03.2016). **13.** Stangenes Industries, Inc. Available at: <http://www.stangenes.com>. (accessed 21.03.2016). **14.** Batygin Ju. V., Serikov G. S., Chaplygin E. A. Chislennaja obrabotka rezul'tatov izmereniya impul'snyh tokov pojansom Rogovskogo [Measuring results numeral treatment of impulsive currents by means of Rogovsky belt application]. Avtomobil'nyj transport. 2009. No. 25. P. 194-199. **15.** Kovnerev M., Troickij Ju. Ispol'zovanie katushki Rogovskogo dlja tokovyh izmerenij [The use of a Rogowski coil for measuring the current]. Jelektronnye komponenty. 2005. No. 5. P. 123-127. **16.** Baranov P. F., Cimbalist Je. I., Borikov V. N., Bedareva E. V. Ustrojstvo dlja poverki shunta [The device for shunt testing]. Patent RF, no. 139577, 2014. **17.** Denisova N. Novaja jera v sisteme kalibrovki [A new era in calibration system]. Sovremennaja jelektronika. 2011. No. 5. P. 34-37. **18.** Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki [Fundamentals of electrical engineering]. Moscow, Vysshaja shkola, 1976. Vol. 1. 544 p. **19.** Zhekul V. G., Kuchernjuk V. A., Mel'her Ju. I., Poklonov S. G., Smirnov A. P., Shvec I. S. Jelektrozrazjadnaja obrabotka skvazhin na neftedobvyajushhijh mestorozhdenijah Ukrainy [Electrodischarge treatment of wells at oil fields of Ukraine]. Vestnik NTU "HPI". Serija: Tehnika i jelektrofizika vysokih naprjazhenij. 2012. No. 21. P. 72-77. **20.** Shwets I. S., Grebennikov I. Yu., Gynko V. I., Dmitrishin A. Ja., Onishenko L. I. About Increase of the Specific Energy Characteristics and Lifetime of Higt - Voltage Pulse Capacitors. 13th International Simposium on Higt Current Electronics: Proceedings. Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS, 2004. P. 130-133. **21.** Shwets I. S., Kurashko Y. I., Klimanskiy N. N., Hvoshan O. V., Onishenko L. I. Elektrohydroimpulse equipment for Increase of Oil and Intake Wells. 13th International Simposium on High Current Electronics: Proceedings. Tomsk, Publishing house of the IAO SBRAS, 2004. P. 409-411. **22.** Sofijskij K. K., Filimonov P. E., Bokij B. V., Shvec I. S., Cherednikov V. V., Smirnov A. P., Agaev R. A. Dinamicheskie sposoby dekol'matacii poverhnostnyh skvazhin [Dynamic methods of declmation of surface wells]. Doneck, Shidnij vidavnichij dim, 2014. 248.

Поступила (received) 19.02.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Жекул Василий Григорьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, e-mail: v_zhekul@mail.ru

Zhekul Vasilii Grigoryevich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: v_zhekul@mail.ru

Поклонов Сергей Георгиевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, e-mail: sergeypoklonov@mail.ru

Poklonov Sergey Georgievich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: sergeypoklonov@mail.ru

Смирнов Алексей Петрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, e-mail: aps-78@mail.ru

Smirnov Oleksiy Petrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: aps-78@mail.ru

Макаренко Владимир Сергеевич – инженер 2 категории, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, e-mail: vladimir.makarenko17@gmail.com

Makarenko Volodymyr Sergijovich – Engineer II cat., Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: vladimir.makarenko17@gmail.com

УДК 621.317.3

В. В. КНЯЗЕВ, И. А. ПОСТЕЛЬНИК

РЕАЛИЗАЦИЯ ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ГРОЗОВОЙ ОПАСНОСТИ

Представлены результаты разработки локальной системы предупреждения о грозовой опасности, которая осуществляется по схеме «снизу-вверх». Такая схема имеет существенные преимущества по сравнению с аналогичными системами, которые функционируют в странах G20. Преимущество достигается за счет установки большого числа простых и дешевых локальных элементов, которые объединяются в многоуровневую сеть посредством передачи данных через сотовые сети и Интернет. Только такая концепция построения обеспечивает возможность создания системы оперативного предупреждения. Действительно, число пользователей, которые за свои средства устанавливают элементы локальной системы предупреждения о грозовой опасности, может достаточно быстро (в течении нескольких лет) превысить 1% от числа жителей в тех местах, где проблема молниезащиты актуальна. Описано устройство автономного индикатора грозовой опасности ИКС-1, функционирующего на эффекте коронного разряда со стержневых молниеприемников.

Ключевые слова: грозовая опасность, локальная система предупреждения, индикатор грозовой опасности.

Введение. Линейные молнии «облако-земля» явление достаточно частое. Однако, число (N_g) таких разрядов молнии в год на квадратный километр весьма неравномерно распределено по районам Земли. Наибольшая молниевая активность $N_g \approx 100$ [1] наблюдается в центральных районах Азии, Африки и Южной Америки. В большинстве из этих районов находятся страны третьего мира. В связи с этим, общее число человеческих жертв ежегодно растет. Например, на Украине при среднем числе $N_g \approx 4$, ежегодно от прямых ударов и косвенных воздействий молнии гибнут и получают травмы до 50 человек. Как правило, это происходит на открытых пространствах вблизи водоемов, игровых площадках и т.п.

В настоящее время в Украине отсутствует инфраструктура, обеспечивающая регистрацию параметров молний и позволяющая осуществить преду-

предление людей об атмосферных процессах, которые с высокой вероятностью могут привести к появлению молнии в конкретном районе.

В большинстве стран, относящихся к группе G20, существуют национальные сети регистрации молний, обеспечивающие прогноз динамики грозовой активности. Наиболее развита такая инфраструктура в США, где функционирует несколько независимых сетей. Основной сетью является National Lightning Detection Network (NLDN), которая имеет более 100 стационарных станций, расположенных по всей территории США, и ряд спутников на геостационарных орбитах, обеспечивающих визуальное наблюдение. Каждая станция оснащена разнообразными средствами измерения электромагнитных эффектов, сопровождающих молнию. Разработчики NLDN утверждают, что обеспечивается фиксация не менее 95 % всех раз-

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Жекул Василий Григорьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, e-mail: v_zhekul@mail.ru

Zhekul Vasily Grigoryevich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: v_zhekul@mail.ru

Поклонов Сергей Георгиевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, e-mail: sergeypoklonov@mail.ru

Poklonov Sergey Georgievich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: sergeypoklonov@mail.ru

Смирнов Алексей Петрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, e-mail: aps-78@mail.ru

Smirnov Oleksiy Petrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: aps-78@mail.ru

Макаренко Владимир Сергеевич – инженер 2 категории, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, e-mail: vladimir.makarenko17@gmail.com

Makarenko Volodymyr Sergijovich – Engineer II cat., Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: vladimir.makarenko17@gmail.com

УДК 621.317.3

В. В. КНЯЗЕВ, И. А. ПОСТЕЛЬНИК

РЕАЛИЗАЦИЯ ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ГРОЗОВОЙ ОПАСНОСТИ

Представлены результаты разработки локальной системы предупреждения о грозовой опасности, которая осуществляется по схеме «снизу-вверх». Такая схема имеет существенные преимущества по сравнению с аналогичными системами, которые функционируют в странах G20. Преимущество достигается за счет установки большого числа простых и дешевых локальных элементов, которые объединяются в многоуровневую сеть посредством передачи данных через сотовые сети и Интернет. Только такая концепция построения обеспечивает возможность создания системы оперативного предупреждения. Действительно, число пользователей, которые за свои средства устанавливают элементы локальной системы предупреждения о грозовой опасности, может достаточно быстро (в течении нескольких лет) превысить 1% от числа жителей в тех местах, где проблема молниезащиты актуальна. Описано устройство автономного индикатора грозовой опасности ИКС-1, функционирующего на эффекте коронного разряда со стержневых молниеприемников.

Ключевые слова: грозовая опасность, локальная система предупреждения, индикатор грозовой опасности.

Введение. Линейные молнии «облако-земля» явление достаточно частое. Однако, число (N_g) таких разрядов молнии в год на квадратный километр весьма неравномерно распределено по районам Земли. Наибольшая молниевая активность $N_g \approx 100$ [1] наблюдается в центральных районах Азии, Африки и Южной Америки. В большинстве из этих районов находятся страны третьего мира. В связи с этим, общее число человеческих жертв ежегодно растет. Например, на Украине при среднем числе $N_g \approx 4$, ежегодно от прямых ударов и косвенных воздействий молнии гибнут и получают травмы до 50 человек. Как правило, это происходит на открытых пространствах вблизи водоемов, игровых площадках и т.п.

В настоящее время в Украине отсутствует инфраструктура, обеспечивающая регистрацию параметров молний и позволяющая осуществить преду-

предление людей об атмосферных процессах, которые с высокой вероятностью могут привести к появлению молнии в конкретном районе.

В большинстве стран, относящихся к группе G20, существуют национальные сети регистрации молний, обеспечивающие прогноз динамики грозовой активности. Наиболее развита такая инфраструктура в США, где функционирует несколько независимых сетей. Основной сетью является National Lightning Detection Network (NLDN), которая имеет более 100 стационарных станций, расположенных по всей территории США, и ряд спутников на геостационарных орбитах, обеспечивающих визуальное наблюдение. Каждая станция оснащена разнообразными средствами измерения электромагнитных эффектов, сопровождающих молнию. Разработчики NLDN утверждают, что обеспечивается фиксация не менее 95% всех раз-

рядов молний «облако-земля» ток которых превышает 5 кА. Погрешность локализации места попадания не превышает 500 м. Примером реализации такой системы в России является система комплексного мониторинга грозовой обстановки и грозовых событий Национального агентства по мониторингу окружающей среды НАМОС [2].

Однако, даже в этих странах нет широкой практики применения локальных систем предупреждения о грозовой опасности в конкретном уединенном месте.

Цель работы. Разработать вариант локальной системы предупреждения о грозовой опасности обеспечивающей высокую степень достоверности, имеющей открытую архитектуру, позволяющую объединять локальные системы в национальную систему посредством сотовой связи и сети Интернет.

Анализ последних исследований и публикаций. Сравнительный анализ используемых методов регистрации, на которых основаны существующие в мире национальные сети регистрации молний, представлен в работе [3]. Результаты анализа однозначно показывают, что все имеющиеся национальные сети обладают существенными недостатками, с точки зрения поставленной нами цели. Такие системы требуют значительных финансовых вложений и постоянного обслуживающего персонала, при этом не обеспечивают главного – оперативного предупреждения людей в конкретном месте. В настоящее время некоторыми фирмами для оперативного предупреждения о грозовой опасности предлагается использовать сенсоры электростатического поля, реагирующие на достижение определенного уровня напряженности поля. Известен сенсор роторного типа EFM-100 Atmospheric Electric Field Monitor компании BOLTEK CORPORATION. Сенсоры такого типа имеют быстро вращающиеся пластины (частота вращения достигает 10 тысяч оборотов в минуту), что требует значительной мощности электрического питания и создает значительные проблемы в обслуживании. Испанская компания Aplicaciones Tecnologicas рекламирует локальную систему, в которой используется сенсор, изготовленный по технологии SECC Technology (controlled field electrometric sensor) без использования механических элементов. Описание принципа действия такого сенсора нам не удалось найти. Очевидным недостатком системы является наличие гальванической связи с устройством обработки информации, что следует из рывководства по монтажу.

Кроме отмеченных выше очевидных недостатков предлагаемых локальных систем, следует отметить и такой. Степень достоверности грозовой опасности, как показано в работах Э.М. Базеляна, например, [4-6] определяется корреляцией уровня напряженности электрического поля и скоростью его нарастания. Следовательно, можно предположить, что предлагаемые на рынке локальные системы не обеспечивают максимально возможной степени достоверности предупреждения о грозовой опасности. Значительное число ложных срабатываний может способствовать тому, что люди перестанут воспринимать сигнал об

опасности серьезно, и просто не станут реагировать на него. Особенно, этот субъективный фактор важен в местах отдыха.

Прототип локальной системы. Известна система комплексного мониторинга и грозовых событий НАМОС [2]. Система позволяет в реальном времени получать в двухмерном отображении информацию о месте и времени грозового разряда. В свою очередь, это позволяет учитывать грозовую активность в регионах при проектировании протяженных объектов, в частности, трубопроводов, линий электропередачи, железнодорожных магистралей и др. Непосредственная регистрация грозовых явлений осуществляется при помощи трех различных систем прямого измерения [2]:

Системы мониторинга грозовых разрядов на ВЛ, которая состоит из двух регистраторов грозовых перенапряжений (РГПН) расположенных на подстанциях по концам линии. Сигнал регистрируется на всех трех фазах, считывание производится с нижней обкладки конденсатора связи. Каждый из регистраторов GPS-синхронизирован во времени и имеет выход в сеть Интернет по выделенному каналу. Таким образом, получаемые осциллограммы происходящих перепадов напряжения на проводах линии передаются для последующей обработки на центральный процессор системы. После анализа информация с оценкой зарегистрированного события становится доступной пользователям через сайт разработчика.

Комплекса регистрации токов молнии на опорах ВЛ электронным способом. Он включает в себя датчики тока молнии (ДТМ), аппаратуру для сбора информации и программно-аппаратный комплекс для определения тока молнии расчетным путем на основании зафиксированной датчиками информации. Каждый из датчиков представляет собой законченный необслуживаемый электронный узел, имеющий встроенный аккумулятор и солнечную батарею, которые обеспечивают автономность работы в течение грозового сезона, а также первичный датчик тока (пояс Роговского), блоки обработки, регистрации сигнала и долговременного хранения полученных данных. В работе [7] описан усовершенствованный вариант датчика, названный регистратор тока молнии.

Комплекса магнитной регистрации токов молнии. Комплекс состоит из устанавливаемых парно («+» и «-» полярности) основных и дополнительных контрольных магнитных регистраторов токов молнии (МР), расположенных на всех опорах, индикатора наличия намагниченности и устройства для проверки намагниченности МР. Количество устанавливаемых на одну опору МР составляет от двух до четырнадцати пар в зависимости от ее конструкции плюс по одному контрольному МР на каждую опору.

Наблюдательная сеть системы дистанционной гронопеленгации (СДП) построена на оборудовании фирмы Vaisala и состоит из четырех расположенных в зоне ВЛ датчиков модели LS8000, которые работают в широком частотном диапазоне и имеют GPS-синхронизацию по времени и связь с сетью Интернет. Первичная обработка получаемых данных происходит

на центральном процессоре обработки данных Vaisala TLP, последующий анализ полученной информации производится параллельно системой Vaisala AP5000 и информационной системой, разработанной ЗАО «НАМОС».

Недостатками этой системы является функциональная ограниченность по территории. Ее работоспособность рассчитана на обслуживание только территорий, где расположены сети высокого напряжения. Постоянная передача видеoinформации (осциллограмм) по спутниковым каналам связи и каналам Интернет из сети датчиков вызывает их перегрузку и частые сбои. Кроме того, задержка во времени между моментом возникновения физической опасности и моментом ее отражения на сайте системы слишком велика, с точки зрения поставленной нами цели.

Однако, учитывая все положительные аспекты, система НАМОС принята в качестве прототипа для разработки концепции построения в Украине национальной системы мониторинга грозовой опасности по схеме восхождения «снизу-вверх».

Предлагаемая структура локальной системы.

Наиболее подходящим для создания локальной системы предупреждения (ЛСП) о грозовой опасности является использование существующей сети мобильной связи и сети Интернет. Предлагаемая ЛСП включает: автономные индикаторы грозовой опасности, автономные модули сбора информации и сети передачи/сбора информации. Иллюстративно, общая схема

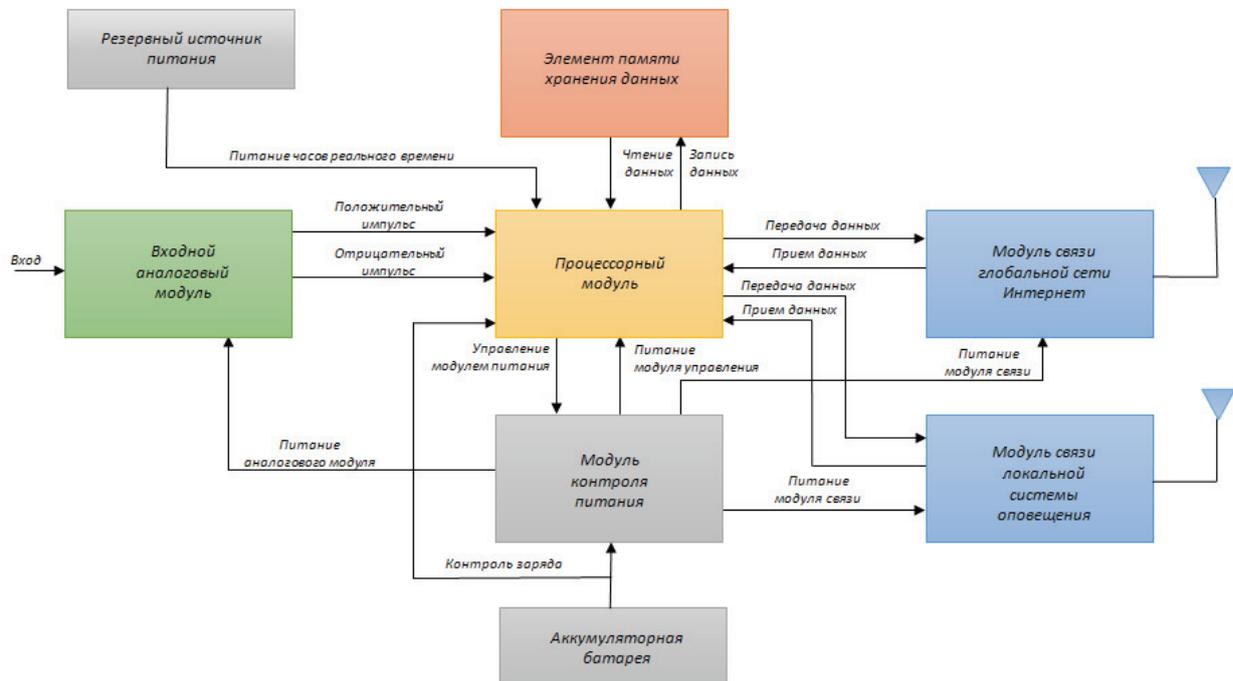


Рисунок 1 – Структурная схема автономного индикатора грозовой опасности ИКС-1

Принцип действия индикатора грозовой опасности ИКС-1 основан на регистрации числа импульсов тока короны со стержневых молниеприемников. В работах [9-10] установлена зависимость числа импульсов от напряженности электрического поля, длины стержня, формы его поперечного сечения и формы

ЛСП представлена в работе[8]. Автономный индикатор грозовой опасности ИКС-1 обеспечивает подачу сигнала тревоги непосредственно в районе, где он установлен и через свой канал мобильной связи на сервер национальной системы предупреждения о грозовой опасности (НСПГО). Блок-схема автономного индикатора грозовой опасности представлена на рис. 1. Входной аналоговый модуль – принимает сигнал с шунта стержня. Усиливает и разделяет биполярные импульсы на однополярные направляет их по разным каналам. Если сигнал приходит амплитудой выше заданного уровня, срабатывает триггер и передает сигнал в виде ТТЛ уровня к процессорному модулю.

Процессорный модуль работает в одном из указанных далее режимов:

- считает количество входных импульсов в секунду отрицательной и положительной полярности;
- записывает значение количества импульсов в элемент памяти с указанием полярности, даты и точного времени;
- при наличии импульсов запускает модуль связи с сетью Интернет и передает значения с памяти к серверу сбора и обработки данных;
- передает сигнал предупреждения по локальному радиоканалу к системе оповещения на объекте;
- контролирует уровень заряда аккумулятора и управляет модулем питания;
- реализует часы реального времени, а также самозапуск в указанное время по будильнику.

вершины. Исходная информация сразу представлена в цифре, что позволяет практически без дополнительных усилий измерять скорость изменения напряженности электрического поля. В качестве преобразовательного элемента используется измерительный шунт включенный в цепь заземления стержня, или пояс Ро-

говского, охватывающий стержень, по аналогии с тем, как это реализовано в работе [7]. Использование пояса Роговского предпочтительно, поскольку позволяет использовать в качестве чувствительного элемента ИКС-1 огромное число уже существующих стержневых молниеприемников. Однако, при этом, в ряде случаев возникают трудности с обеспечением достаточного уровня чувствительности, поскольку импульсы тока лежат в наносекундном диапазоне, а пиковое значение силы тока импульса может начинаться с единиц миллиампер. Аналоговая часть ИКС-1 выполнена на быстродействующих операционных усилителях компании Analog Devices AD8039 и AD8038. Два соединенных последовательно усилительных каскада усиливают амплитуду биполярных импульсов в 4 раза. После чего биполярные импульсы разделяются на два канала отрицательных однополярных импульсов и конвертируются в импульсы TTL-уровня с помощью инвертора и триггеров Шмитта. Далее импульсы с двух каналов поступают на входы счетчика, выполненного на микроконтроллере (МК) STM32F031 фирмы ST Microelectronics.

В момент первого включения ИКС-1 происходит инициализация внутренних часов реального времени МК, и синхронизация их с сервером. В последующие включения проверяется лишь наличие импульсов и состояние аккумуляторной батареи. Период включения может задаваться пользователем с сервера. Связь с сервером осуществляется через GPRS-связь, для этого в схеме используется GSM/GPRS-модем SimCom SIM900. В других модификациях ИКС-1, в качестве канала связи выступает WiFi или Ethernet соединение.

В момент каждого дежурного включения могут происходить следующие штатные события:

- наличия импульсов по одному из каналов счетчика. МК включает GSM/GPRS-модем и начинает передачу количества импульсов в секунду на сервер и параллельно записывает эти данные на съемный носитель SD-карту.

- наличие низкого уровня элемента питания ИКС-1. МК включает GSM/GPRS-модем и передает на сервер сигнал тревоги о низком значении напряжения элемента питания.

Когда ни одного из штатных событий не зафиксировано, МК переходит в режим сверхнизкого энергопотребления и работают только часы реального времени, которые в заданные интервалы времени переводят МК в дежурный режим. С целью дополнительного энергосбережения GSM/GPRS-модем не включается без наличия описанных выше событий. Таким образом, ресурса аккумулятора хватает более чем на один год эксплуатации без подзарядки.

Автономные модули сбора информации предназначены для оцифровки данных, получаемых от первичных преобразователей импульсных электрических и магнитных полей, сопровождающих молниевые разряды, и последующей передачи этих данных на сервер национальной системы предупреждения и мониторинга. Передача данных осуществляется по каналам сотовой сети и сети Интернет. Автономный модуль сбора информации имеет структуру, представленную в ра-

боте [8]. Естественно, что его структура имеет сходство со структурой наблюдательной сети СДП системы НАМОС [2]. Однако, имеются существенные отличия, в частности первичными преобразователями импульсных электрических и магнитных полей микросекундного / миллисекундного диапазона, а также методами обработки данных, поступающих с этих преобразователей. Для исследовательских целей, комплект первичных преобразователей содержит: сенсор импульсного электрического поля (вертикальная компонента), сенсор импульсного магнитного поля (горизонтальная компонента), сенсор импульсного электрического поля (горизонтальная компонента), сверхширокополосный сенсор импульсного магнитного поля (горизонтальная компонента).

Предусмотрено, что вся совокупность регистрируемых амплитудно-временных параметров импульсов в режиме реального времени записывается на карту памяти SD, а на сервер передается только часть информации о максимальном значении физической величины, времени достижения максимального значения и времени спада сигнала до уровня 0,1 от пикового значения. Такой объем информации беспрепятственно проходит по каналам сотовой связи и сети Интернет.

Выводы. Создание национальной системы предупреждения о грозовой опасности в отличие от аналогичных систем, функционирующих в странах первого мира, предлагается осуществить по схеме «снизу-вверх», за счет установки большого числа простых и дешевых локальных элементов, которые объединяются в многоуровневую сеть посредством передачи данных через сотовые сети и Интернет. Только такая концепция обеспечивает возможность создания системы оперативного предупреждения. Действительно, число пользователей, которые за свои средства устанавливают элементы локальной системы предупреждения о грозовой опасности, может достаточно быстро (в течение нескольких лет) превысить 1% от числа жителей в тех местах, где проблема молниезащиты актуальна.

Каждый локальный элемент обеспечивает своевременное предупреждение о грозовой опасности в том месте, где он установлен, путем подачи звуковой и/или световой сигнализации, обеспечивает распространение предупреждающих SMS-сообщений на устройства мобильной связи находящиеся в зоне вышки сотовой связи, которая обслуживает элемент системы, и передает информацию на сервер национальной системы.

Информация, передаваемая со всех задействованных локальных элементов на сервер национальной системы обрабатывается в онлайн режиме и может быть доступна из общего окна сайта национальной системы. На сайте национальной системы ведется обработка информации со всех индикаторов грозовой опасности с целью визуализации движения грозового фронта и осуществления краткосрочных (до 3 часов) прогнозов.

Представлен пилотный вариант реализации ло-

кальной системы на базе индикатора напряженности электрического поля (ИКС-1), основанного на подсчете числа стримеров со стержневого молниеприемника. ИКС-1 имеет ряд важных функциональных преимуществ перед предлагаемыми на рынке аналогичными индикаторами.

Список литературы: 1. <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=85600>. 2. <http://www.namos.ru/press/publications/a3/> 3. Amitabh Nag. Lightning Locating Systems: Characteristics and Validation Techniques / Amitabh Nag, Martin J. Murphy, Wolfgang Schulz, Kenneth L. Cummins // Proc. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, 2014. – PP. 824-836. 4. Базелян Э.М. Физика молнии и молниезащиты / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 320 с. 5. Базелян Э.М. Эффект объемного заряда короны в молниезащите / Э.М. Базелян // Сборник докладов IV Международной конференции по молниезащите. Санкт-Петербург, 27-29 мая 2014. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та., 2014. – С. 1-16. 6. Базелян Э.М. Способ оповещения о грозовой опасности на борту летательного аппарата / Э.М. Базелян, В.А. Бранденбургский, И.Г. Пулавская // Авторское свидетельство № 2774627/23. 7. Чулков А.Н. Новые технологии регистрации токов молнии с высоким разрешением / А.Н. Чулков, С.В. Козлов, Э.М. Базелян и др. // Сборник докладов IV Международной конференции по молниезащите. Санкт-Петербург, 27-29 мая 2014. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 247-252. 8. Серков А.А. Система раннего предупреждения грозовой опасности / А.А. Серков, С.А. Никитин, В.В. Кравченко, В.В. Князев // Вестник НТУ «ХПИ» «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2015. – Вып. 51. – С. 95-99. 9. Князев В.В. Эффекты коронирования в условиях предразрядной обстановки / В.В. Князев, А.Ю. Чернухин // Сборник докладов IV Международной конференции по молниезащите. Санкт-Петербург, 27-29 мая 2014. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та., 2014. – С. 62-70. 10. Чернухин А.Ю. Особенности стримерной короны со стержневых молниеприемников / А.Ю. Чер-

нухин, В.В. Князев // Вестник НТУ «ХПИ» «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2015. – Вып. 20. – С.149-155.

Bibliography (transliterated): 1. <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=85600>. 2. <http://www.namos.ru/press/publications/a3/>. 3. Amitabh Nag. Lightning Locating Systems: Characteristics and Validation Techniques. Amitabh Nag, Martin J. Murphy, Wolfgang Schulz, Kenneth L. Cummins. Proc. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, 2014. pp. 824-836. 4. Bazeljan Je. M. Fizika molnii i molniezashhity. Je.M. Bazeljan, Ju. P. Rajzer. Moscow: FIZMATLIT, 2001. 320 p. 5. Bazeljan Je. M. Jeffekt ob#mnogo zarjada korony v molniezashhite. Je.M. Bazeljan. Sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoj konferencii po molniezashhite. Sankt-Peterburg, 27-29 maja 2014. Sankt Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta., 2014. pp.1-16. 6. Bazeljan Je.M. Sposob opoveshhenija o grozovoj opasnosti na bortu letatel'nogo apparata. Je.M. Bazeljan, V.A. Brandenburgskij I.G. Pulavskaja. Avtorskoe svidetel'stvo №2774627/23. 7. Chulkov A.N. Novye tehnologii registracii tokov molnii s vysokim razresheniem. A.N. Chulkov, S.V. Kozlov, Je. M. Bazeljani i dr. Sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoj konferencii po molniezashhite. Sankt-Peterburg, 27-29 maja 2014. Sankt Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta., 2014. pp. 247-252. 8. Serkov A.A. Sistema rannego preduprezhdenija grozovoj opasnosti. A.A. Serkov, S.A. Nikitin, V.V. Kravchenko, V.V. Knjazev. Vestnik NTU "KhPI" "Tehnika I jelektrofizika vysokih naprjazhenij", Vol. 51. 2015. pp. 95-99. 9. Knjazev V.V. Jeffekty koronirovanija v uslovijah predrazrjadnoj obstanovki. V.V. Knjazev, A.Ju. Chernuhin. Sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoj konferencii po molniezashhite. Sankt-Peterburg, 27-29 maja 2014. Sankt Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2014. pp. 62-70. 10. Chernuhin A.Ju. Osobennosti stri mernoj korony so stержnevych molniepriemnikov. A.Ju. Chernuhin, V.V. Knjazev. Vestnik NTU "HPI" "Tehnika I jelektrofizika vysokih naprjazhenij". Vol. 20. 2015. pp. 149-155.

Поступила (received) 22.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Князев Владимир Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» НТУ «ХПИ», тел.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua.

Князев Володимир Володимирович – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Staff Scientist, principal scientist, Research and Design Institute "Molniya" NTU "KhPI", tel.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua.

Постельник Игорь Александрович – аспирант, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» НТУ «ХПИ», тел.: (097) 166-33-59, e-mail: gor132@i.ua.

Postilnyk Igor Oleksandrovych - postgraduate student, Research and Design Institute "Molniya" NTU "KhPI", tel.: (097) 166-33-59, e-mail: gor132@i.ua.

УДК 537.8 : 537-7

Ю. В. КОВТУН, Є. В. СЮСЬКО**ВИСОКОВОЛЬТНА СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ ГАЗОМЕТАЛЕВОЇ ПЛАЗМИ**

В роботі розглянута високовольтна система живлення магнітної системи електрофізичної установки для отримання та дослідження багатокомпонентної газометалевої плазми. Описані конструкційні особливості імпульсної високовольтної системи живлення магнітної системи електрофізичної установки. Отримані розрахункові і експериментальні залежності розрядного струму через магнітну систему від часу. Розглянута можливість зміни форми імпульсу струму через магнітну систему та наближенні її до прямокутної.

Ключові слова: магнітна система, струм, напруга, розряд, електрична схема, індуктивність, опір, ємність.

Вступ. Експериментальне дослідження плазми в схрещених $E \times B$ полях представляє інтерес для широкого кола фізичних і прикладних завдань фізики плазми при дослідженні лабораторної, термоядерної і космічної плазми [1]. Одним з цих завдань є дослідження багатокомпонентної газометалевої плазми [2], яка утворюється в пристроях з схрещеними $E \times B$ полями, які розглядаються як один із можливих варіантів створення пристроїв для розділення речовини на масові групи і елементи [3]. Тому постає нагальною постановка та проведення експериментальних досліджень властивостей багатокомпонентної газометалевої плазми, створеної контрольованим способом.

Важливою частиною електрофізичних пристроїв з схрещеними $E \times B$ полями є системи живлення магнітної та електродно-розрядної систем. Основні параметри систем живлення формують можливі експериментальні умови при дослідженні плазми. При лабораторних дослідженнях також є вагомою можливість зміни у широкому діапазоні параметрів систем живлення. Створення густої плазми у сильних магнітних полях потребує достатньо потужних систем живлення, що вирішується у лабораторних умовах шляхом переходу від стаціонарних джерел до імпульсних.

Значна роль при створенні імпульсних магнітних систем відводиться системам їх живлення. Вибір оптимальних електрофізичних параметрів системи живлення та її конструкції дає змогу створювати достатньо сильні магнітні поля при прийнятних габаритних розмірах системи живлення магнітної системи. У лабораторних умовах вагомою є можливість зміни у широкому діапазоні значень розрядного струму через магнітну систему, відповідно величини магнітного поля. Не менш важливим є виконання умови зміни тривалості та форми імпульсу струму через магнітну систему.

В даній роботі розглядається високовольтна система живлення магнітної системи електрофізичної установки для отримання та дослідження багатокомпонентної газометалевої плазми. Розглянута можливість зміни форми імпульсу струму через магнітну систему та наближенні її до прямокутної.

Опис магнітної системи. Магнітне поле пробкової конфігурації, з пробковим відношенням 1,25, формується при розряді високовольтної системи живлення на шість соленоїдів два з яких торцеві і чотири центральні. Соленоїди виготовлені по типу соленоїдів

Біттера [4]. Матеріал дисків – алюміній. Два торцевих соленоїда мають внутрішній діаметр 23 см, зовнішній 44 см, кількість дисків 30. Чотири центральних соленоїда мають внутрішній діаметр 23 см, зовнішній 44 см, кількість дисків 40. Соленоїди мають повітряне охолодження. Більш детальна інформація магнітної системи наведена у роботі [5].

Високовольтна система живлення магнітної системи. Високовольтну систему живлення магнітної системи можна розділити на три основні блока: 1 – блок живлення нагромаджувача, 2 – блок ємнісного нагромаджувача, 3 – блок комутації.

Блок живлення нагромаджувача складається з автотрансформатора, високовольтного трансформатора і блоку випрямляча на діодах типу Д 1006. Блок ємнісного нагромаджувача системи живлення магнітної системи установки складається з 120 шт. конденсаторів типу ИМ-3-100 (100 мкФ, 3 кВ) з загальною ємністю 12 мФ та максимальним енерговмістом 54 кДж. Для зменшення габаритів ємнісного накопичувача конденсатори були зібрані в батарею, яку розмістили на чотирьох поверхах спеціальної конструкції по 30 конденсаторів на кожному поверху. Конденсатори з'єднані паралельно мідною шиною перерізом $2 \times 0,3$ см і загальною довжиною 41,76 м. Батарея з'єднана з соленоїдами магнітної системи високовольтним кабелем загальною довжиною 20 м. До блока комутації входять комутатори на основі тиристорів ТЗ-320 та Т9-250, та їхня система запуску.

На рис. 1 зображена електрична схема системи живлення магнітної системи. Схема працює наступним чином. Схема живиться від електричної мережі 50 Гц, 220 В. Після вмикання перемикача SB 1 спрацьовує електромагнітний пускач К 1 і розмикаються контакти К 1.1 і К 1.2, які, при вимиканні живлення, замикають та зашунтовують контур ємнісного нагромаджувача через резистор R 13. Напруга подається на автотрансформатор TV 2, який регулює напругу, що подається на первинну обмотку високовольтного трансформатора TV 1. В подальшому з вторинної (високовольтної) обмотки трансформатора TV 1 напруга випрямляється системою діодів VD 1 – VD 7 і подається на батарею конденсаторів С 1 – С 120. На кожні 12 конденсаторів ставиться по 1 сигнальній лампі HL 1 – HL 12, по одному захисному резистору R 1 – R 12 та запобіжнику FU 1 – FU 12. Зарядна напруга

контролюється за допомогою кіловольметра kV, який вимірює напругу в двох діапазонах: 1,5 кВ та 3 кВ.

Пристрій формування керуючого імпульсу виконаний на основі тиратронів VL 1, VL 2, які живляться за допомогою трансформаторів TV 5, TV 6 і TV 7. Імпульс від блока запуску подається на імпульсні трансформатори TV 5, TV 6, після чого відбувається відкриття сітки тиратрона та формування керуючого

імпульсу, що подається через роздільні імпульсні трансформатори TV 8 і TV 9, діоди VD 10 – VD 13, на тиристри VS 1 – VS 4. Після чого відбувається розряд блока ємнісного накопичувача на магнітну систему установки. Запуск тиристора VS 4 відбувається з запізненням на 18 мс після відкриття VL 2. Це запобігає виникненню негативного півперіоду розряду на магнітну систему.

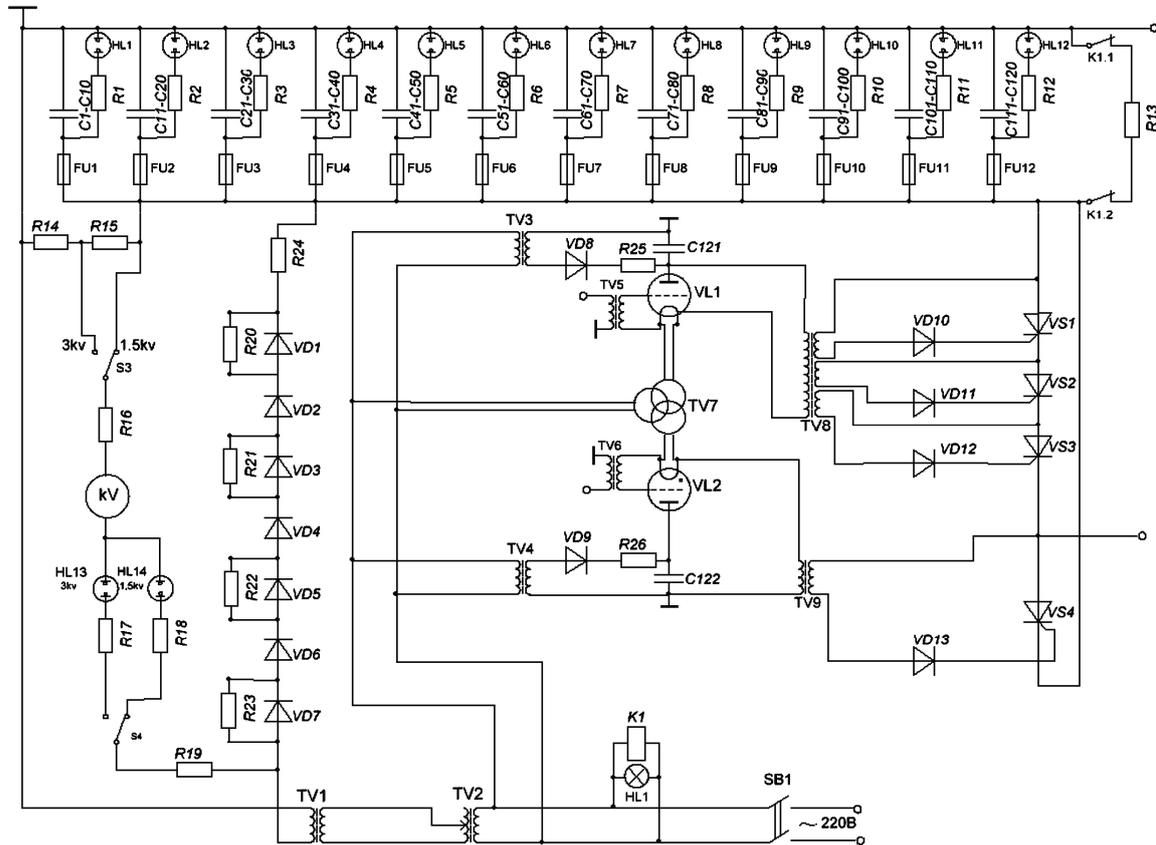


Рисунок 1 – Схема живлення магнітної системи

Розрахунок розрядного струму магнітної системи. В першому наближенні систему живлення магнітної системи можливо розглядати у вигляді схеми послідовного кола з зосередженими та постійними ємністю C , індуктивністю L та опором R , яка зображена на рис. 2. У цьому випадку, як видно з рис. 2, розряд ємнісного накопичувача на магнітну систему можна наближено розглядати, як розряд ємності в RLC колі [5]. Сумарний опір R та індуктивність L кола складаються з суми опорів та індуктивностей соленоїдів, кабелю, що з'єднує блок конденсаторів з соленоїдами, шин, що з'єднують між собою конденсатори, і шин, що з'єднують соленоїди. Спільна ємність C складається з суми ємностей 120 конденсаторів підключених паралельно.

Згасаючі електромагнітні коливання в RLC описуються однорідним диференціальним рівнянням другого порядку:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C \cdot L} = 0, \quad (1)$$

де q – заряд; $q = \int Idt$; I – струм; $I(t) = -\frac{dq}{dt}$. Можливі три рішення рівняння 1 при наступних умовах:

$R < 2\sqrt{L/C}$, $R = 2\sqrt{L/C}$, $R > 2\sqrt{L/C}$. У даному випадку при параметрах кола ємності $C = 12$ мФ, індуктивності $L = 2,66$ мГн та опору $R = 0,107$ Ом виконується умова $R < 2\sqrt{L/C}$. У цьому випадку загальне рішення рівняння 1 має вигляд:

$$q(t) = e^{-\beta t} \left(c_1 \cdot \cos\left(\frac{\omega}{2} \cdot t\right) + c_2 \cdot \sin\left(\frac{\omega}{2} \cdot t\right) \right), \quad (2)$$

де β – ступінь згасання в колі; $\beta = \frac{R}{2L}$; ω – кутова

частота, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$; ω_0 – власна частота коливань,

$\omega_0 = \sqrt{1/LC}$; c_1 та c_2 – константи. При початкових умовах ($t = 0$; $I(0) = 0$; $q(0) = q_0 = CU_0$, U_0 – початкова напруга на ємнісному накопичувачі) константи c_1 та c_2 мають значення:

$$c_1 = q_0; \quad c_2 = \frac{2q_0\beta}{\omega}. \quad (3)$$

На рис. 3 представлено результати розрахунку напруги, струму, заряду при наступних початкових умовах: $C = 12$ мФ, $L = 2,66$ мГн, $R = 0,107$ Ом,

$U_0 = 1500$ В.

У другому наближенні систему живлення можна розглядати у вигляді довгої лінії, схема якої зображена на рис. 4, де $C1 - C4$ – ємність 30 конденсаторів розташованих на кожному з чотирьох поверхів відповідно, $R1 - R4$ та $L1 - L4$ – опір та індуктивність шин, що з'єднують конденсатори, $R5$ та $L5$ – опір та індуктивність соленоїдів, шин, що з'єднують соленоїди, та кабелю, що з'єднує батареєю конденсаторів і соленоїди. Моделювання довгої лінії проводилось в програмі Micro-cap 11 for students. Залежність розрядного струму через магнітну систему від часу при $U_0 = 1500$ В для довгої лінії наведена на рис. 5, крива 3.

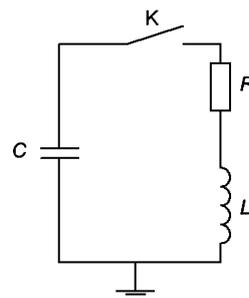


Рисунок 2 – Схема заміщення системи живлення для магнітної системи

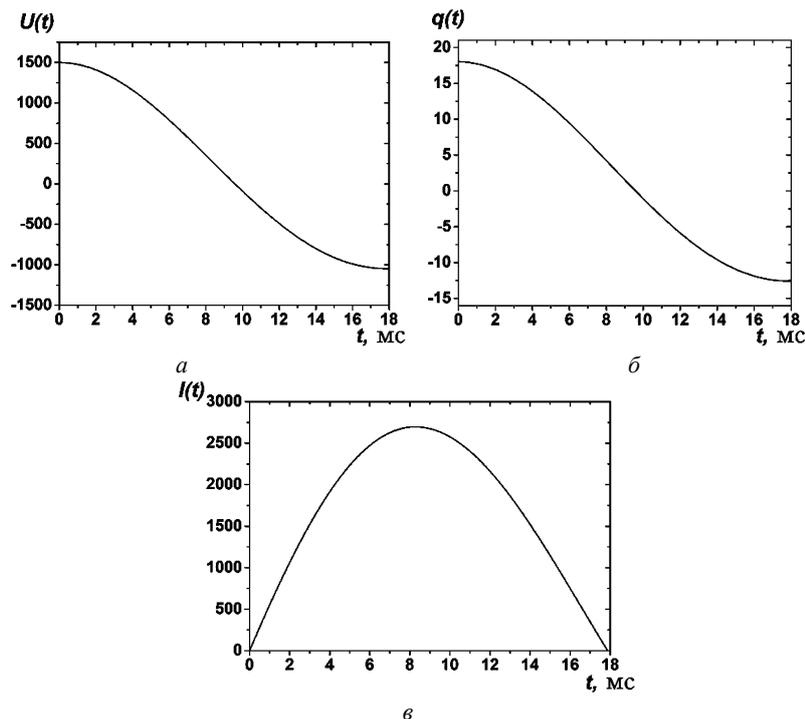


Рисунок 3 – Розрахункові залежності напруги (а), заряду (б) та струму (в) у RLC колі

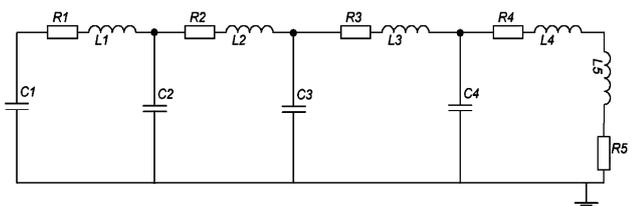


Рисунок 4 – Схема заміщення системи живлення магнітної системи електрофізичної установки у вигляді довгої лінії

Вимірювання розрядного струму через магнітну систему. Важливим при формуванні імпульсного магнітного поля є знання параметрів розрядного струму через магнітну систему. Тому було проведено експериментальне вимірювання струму. Розрядний струм через магнітну систему вимірювався за допомогою шунта, який був підключений послідовно з соленоїдами магнітної системи. Сигнал з шунта реєструвався електронним осцилографом «Velleman PCS 500».

Виміряна залежність розрядного струму через магнітну систему від прикладеної напруги U_0 на ємнісному накопичувачі. Порівняння експериментально виміряної залежності максимального значення розрядного струму від по-

тальної залежності з розрахунковими (див. рис. 5, крива 2,3) показує, що розбіжність тривалості імпульсу струму та його амплітуди (див. рис. 5) не перевищує $\pm 2\%$. Це говорить про те, що розрахунок сумарної ємності, індуктивності і опору магнітної системи виконано вірно. Але в експерименті (див. рис. 5, крива 1) фронт наростає швидше, а спад стрімкіший на відміну з розрахунком для послідовного кола з зосередженими параметрами (див. рис. 5, крива 2). Розрахунок розрядного струму при розгляді схеми живлення у вигляді довгої лінії (див. рис. 5, крива 3) показав, що фронт і спад у цьому випадку став більш наближений до експерименту. З останньої залежності можна зробити висновок, що спрощене представлення реальної схеми у вигляді довгої лінії не достатньо для збігу форми імпульсу, а потрібно знати точний розподіл опору, індуктивності, ємності елементів по довжині лінії.

На рис. 6 зображена залежність максимального значення розрядного струму через магнітну систему від прикладеної напруги U_0 на ємнісному накопичувачі. Порівняння експериментально виміряної залежності максимального значення розрядного струму від по-

чаткової напруги (див. рис. 6) з розрахунковою залежністю (формули 2, 3) показує, що розбіжність між ними не перевищує $\pm 2\%$.

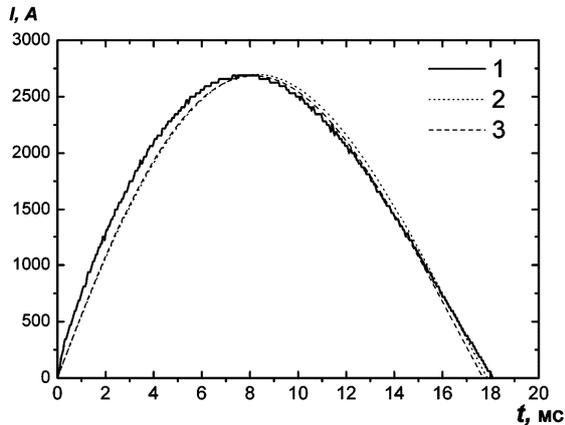


Рисунок 5 – Залежність розрядного струму через магнітну систему від часу. $U_0 = 1500$ В. Експериментально виміряна (1), розрахункові для послідовного кола з зосередженими параметрами (2) та довгої лінії (3)

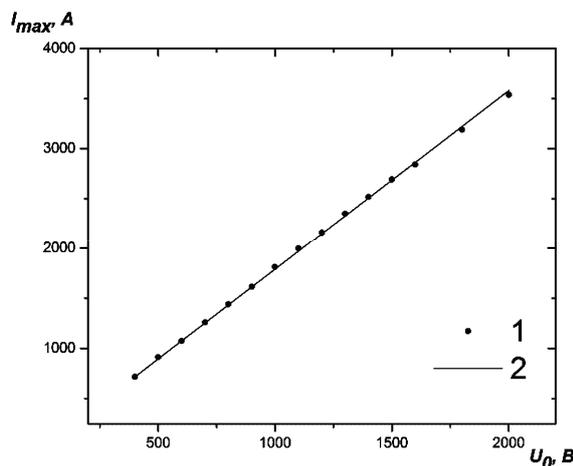


Рисунок 6 – Залежність максимального значення розрядного струму через магнітну систему від прикладеної напруги U_0 на ємнісному накопичувачі. 1 – експеримент, 2 – розрахунок

Формування квазістаціонарного імпульсу магнітного поля. У даному випадку імпульс розрядного струму через магнітну систему має форму першого позитивного пів періоду затухаючої синусоїди (див. рис. 5, рис. 7, крива 1), відповідно цього змінюється і величина магнітного поля. При проведенні експериментальних досліджень плазми в схрещених $E \times B$ полях є потреба досліджень параметрів плазми у квазістаціонарному магнітному полі. У даному випадку це потребує зміни форми імпульсу розрядного струму та наближенні її до прямокутної. Зважаючи на те, що штучна формуюча схема складається з кінцевого числа елементів L та C , сформуванню за допомогою такої схеми імпульсу точно прямокутної форми неможливо. Але при вірному виборі величини елементів L та C вдається отримати на нарузці імпульс з крутим фронтом з чітко вираженим плато, форма якого близька до прямокутної [8].

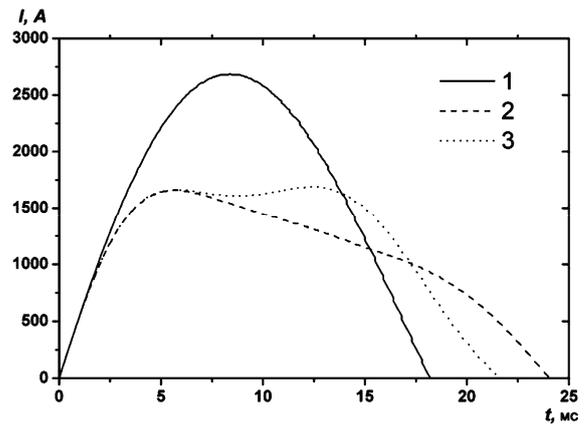


Рисунок 7 – Залежність розрядного струму через магнітну систему від часу. $U_0 = 1500$ В: 1 – без додаткових котушок індуктивності у схемі; 2 – додано в схему три котушки з індуктивністю кожної 1730 мкГн; 3 – додано в схему три котушки з індуктивністю 250, 600 та 1730 мкГн

Для зміни форми розрядного струму і наближенню її до прямокутної було вирішено додати до електричної схеми додаткові котушки індуктивності, що дає змогу внести мінімальну кількість змін у схему живлення магнітної системи. Передбачається встановити три додаткові котушки індуктивності між поверхами ємнісного накопичувача, тобто в електричну схему (див. рис. 1) через 30 конденсаторів включається додаткова індуктивності. Конструктивно котушки індуктивності виконані у вигляді діелектричних циліндрів діаметром 10 см на яких в один шар, стик у стик, намотано мідний дріт \varnothing 2,2 мм. Було розглянуто два варіанти, які відрізнялися параметрами додаткових індуктивностей. В першому варіанті передбачалося встановити три однакові додаткові котушки з індуктивністю кожної 1730 мкГн (кількість витків 136). Результати розрахунку для даного варіанту представлені на рис. 7, крива 2. Як видно з рис. рис. 7, крива 2 включення в схему трьох однакових котушок індуктивності призводить до зміни амплітуди і тривалості розрядного струму, а також змінюється форма імпульсу. Але форма імпульсу розрядного струму не відповідає поставленій задачі. В другому варіанті було підібрано та додано в схему три котушки з індуктивністю 250, 600, 1730 мкГн та відповідно кількістю витків 50, 80, 136. Результати моделювання наведені на рис. 7, крива 3. При цьому формується імпульс розрядного струму (див. рис. 7, крива 3) тривалістю 21,6 мс, форма якого має плато тривалістю 9,6 мс. Зміна розрядного струму на плато не перевищує 5%. Тобто, в даному варіанті є можливість сформувати квазістаціонарне магнітне поле тривалістю 9,6 мс. Недоліком у даному випадку являється суттєве зменшення максимальної амплітуди розрядного струму до 1690 А ($\sim 1,6$ разів) в порівнянні з випадком без додаткових котушок індуктивності у схемі (див. рис. 7, крива 1). Це призведе до того, що зменшиться максимальне значення величини магнітного поля. Але при деяких дослідженнях плазми в схрещених $E \times B$ полях така форма імпульсу може бути цілком задовільною.

Висновки. Розглянуті і описані конструкційні особливості імпульсної високовольтної системи живлення магнітної системи електрофізичної установки для отримання та дослідження багатокомпонентної газометалевої плазми. Проведено порівняння експериментально вимірених значень амплітуди і тривалості імпульсу розрядного струму через магнітну систему з розрахунковими, яке показало, що розбіжність тривалості імпульсу струму та його амплітуди не перевищує $\pm 2\%$. Розглянута можливість зміни форми імпульсу струму через магнітну систему та наближення її до прямокутної у випадку додання до електричної схеми додаткових котушок індуктивності. Розрахунки показали, що при доданні в схему трьох котушок з індуктивністю 250, 600, 1730 мкГн існує можливість сформувати імпульс розрядного струму тривалістю 21,6 мс, форма якого має плато з тривалістю 9,6 мс. Відповідно можливо сформувати квазістаціонарне магнітне поле з тривалістю 9,6 мс.

Список літератури: 1. *Lehnert B.* Rotating plasmas / *B. Lehnert* // Nuclear Fusion. – 1971. – Vol. 11, № 5. – P. 485–533. 2. Rotation of Plasma Layers with Various Densities in Crossed E×B / *Yu.V. Kovtun, E.I. Skibenko, A.I. Skibenko, V.B. Yufarov* // Ukr. J. Phys. – 2013. – Vol. 58, № 5. – P. 450–457. 3. *Fetterman A. J.* Metrics for comparing plasma mass filters / *A. J. Fetterman, N. J. Fisch* // Physics of Plasmas. – 2011. – Vol. 18, № 10. – P. 103503 (8pp). 4. *Bitter F.* The Design of Powerful Electromagnets Part II. The Magnetizing Coil / *F. Bitter* // Review of Scientific Instruments. – 1936. № 7. – P.482–488 5. Электрофизическая установка для исследования свойств многокомпонентной плазмы отражательного разря-

да в среде тяжелых газов и паров металлов / *А. И. Скибенко, Е. И. Скибенко, Ю. В. Ковтун, Ю. В. Ларин* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 44. – С.147–157. 6. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные поля / *Г. Кнопфель*; пер. с англ. под ред. *Ф. А. Николаева, Е. П. Свириденко.* – М.: Мир, 1972 – 382 с. 7. *Монтгомери Д.* Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов / *Д.Монтгомери*; пер. с англ. под ред. *Н. Е. Алексеевского.* – М.: Мир, 1971 – 360 с. 8. *Литвиненко О.Н.* Расчет формирующих линий / *О.Н. Литвиненко, В.И. Сошников.* – К.: ГИТТЛ, 1962 – 116 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Lehnert B.* Rotating plasmas. *B. Lehnert.* Nuclear Fusion. 1971. Vol. 11. № 5. pp. 485–533. 2. Rotation of Plasma Layers with Various Densities in Crossed E×B. *Yu.V. Kovtun, E.I. Skibenko, A.I. Skibenko, V.B. Yufarov.* Ukr. J. Phys. 2013. Vol. 58. № 5. pp. 450–457. 3. *Fetterman A. J.* Metrics for comparing plasma mass filters. *A. J. Fetterman, N. J. Fisch.* Physics of Plasmas. 2011. Vol. 18. № 10. pp. 103503 (8pp). 4. *Bitter F.* The Design of Powerful Electromagnets Part II. The Magnetizing Coil. Review of Scientific Instruments. 1936. № 7. pp. 482–488 5. *Elektrofizicheskaya ustanovka dlya issledovaniya svoystv mnogokomponentnoy plazmy otrazhatelnogo razryada v srede tyazhelykh gazov i parov metallov.* *A. I.Skibenko, E. I. Skibenko, Yu. V. Kovtun, Yu. V. Larin.* Vesnik NTU "KhPI". 2008. № 44. pp. 147–157. 6. *Knopfel G.* Sverkhhsilnyye impulsnyye polya. *G.Knopfel.* per. s angl. pod red. *F. A. Nikolayeva, E. P. Sviridenko.* Moscow: Mir. 1972. 382 p. 7. *Montgomeri D.* Poluchenije silnykh magnitnykh poley s pomoshchyu solenoidov. *D. Montgomeri.* per. s angl. pod red. *N. E. Alekseyevskogo.* Moscow: Mir. 1971 360 p. 8. *O.N. Litvinenko Raschet formiruyushchikh liniy.* *O.N.Litvinenko, V.I.Soshnikov.* Kyyiv: GITTL. 1962. 116 p.

Надійшла (received) 05.04.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковтун Юрій Вікторович, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник; ННЦ ХФТІ НАНУ, тел.: +38(057) 335-63-13; email: ykovtun@kipt.kharkov.ua.

Ковтун Юрій Вікторович, mat. Ph.D.; senior researcher, NSC KIPT, tel.: +38(057) 335-63-13; email: ykovtun@kipt.kharkov.ua.

Сюсько Євген Васильович, молодший науковий співробітник; ННЦ ХФТІ НАНУ, email: zhenya-syusko@kipt.kharkov.ua.

Сіуско Євген Васильович, junior researcher; NSC KIPT, email: zhenya-syusko@kipt.kharkov.ua.

УДК 621.318

В. И. КРАВЧЕНКО, А. А. СЕРКОВ, В. С. БРЕСЛАВЕЦ, И. Л. ЯЦЕНКО, И. В. ЯКОВЕНКО**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ДВУМЕРНОГО (2D) ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА С ПОТОКОМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

В работе получено кинетическое уравнение для поверхностных плазмонов 2D системы, описывающее их взаимодействие с электронным потоком, движущимся по нормали к границе раздела сред. Предполагается, что газ локализован вблизи дельтовидной потенциальной ямы. Найден инкремент неустойчивости. Величина инкремента обратно пропорциональна времени пролета частиц сквозь 2D электронную систему. Получены аналитические решения задач взаимодействия токов, приведенных внешним электромагнитным излучением, с собственными электромагнитными колебаниями структур комплектующих полупроводниковые приборы, в условиях режима неустойчивости (генерации) колебаний. Определены расчетные соотношения для количественных характеристик обратных отказов (степени отклонения ВАХ от нормы) полупроводниковых приборов в зависимости от параметров внешнего электромагнитного излучения и физических качеств материалов, комплектующих приборы.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, кинетические неустойчивости, потенциальный барьер, поток заряженных частиц, генерация, черенковское и переходное излучение, поверхностные волны, проводящее твердое тело, энергия излучения.

Введение. В работе рассматривались механизмы взаимодействия заряженных частиц с поверхностными плазмонами двумерного электронного слоя (2D), основанные на описании свойств плазмонов с помощью кинетических уравнений. При рассмотрении взаимодействия электромагнитных колебаний и заряженных частиц, помимо вероятностного подхода (кинетических уравнений) использовалась также другая методика, позволяющая установить взаимосвязь между электромагнитными полями поверхностных колебаний и волновыми функциями электронов потока на границе. Она обеспечивается с помощью уравнения Шредингера и дополнительных (по сравнению с электродинамическими) граничных условий для возмущенных волновых функций электронов пучка. При этом амплитуды и фазы возмущенных волновых функций электрона определяются уже существующими амплитудой и фазой плазмона, так что взаимодействие волн и частиц носит детерминированный характер. Условия для волновых функций позволяют определить влияние границы (в частности наличие потенциального барьера) на величину инкремента неустойчивости. В рамках данной модели исследовались механизмы возбуждения поверхностных плазмонов и определены выражения для инкрементов их неустойчивости.

В работе учитывалось влияние потенциального барьера не только на поведение заряженных частиц потока, пересекающего границу, но и на спектральные характеристики электронов плазмподобных структур. К ним, в частности, относятся структуры, в которых наличие потенциала приводит к возникновению двумерного (2D) электронного газа. Интерес к двумерным системам, связанный с их уникальными свойствами [1] (квантовый эффект Холла, особенности фазовых переходов), последнее время усилился с появлением новых технологий создания наноструктур, перспективных для радиофизики твердого тела [1-3].

Основные результаты. Рассмотрим взаимодействие плазменных колебаний двумерного электронного газа с потоком заряженных частиц, который дви-

жется по нормали к границе раздела сред [4].

Пусть на границе двух сред, различающихся электромагнитными свойствами, имеется бесконечно тонкий слой электронов, поведение которых мы будем описывать уравнением Шредингера:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi_k + [\varepsilon_k - V_0 \delta(y)] \Psi_k = 0, \quad (1)$$

с потенциальным барьером $U(y) = -V_0 \delta(y)$, ε_k – энергия частицы; m_e – эффективная масса.

Для нахождения их спектра представим волновую функцию частицы Ψ_k в областях $y < 0$ и $y > 0$ следующим образом:

$$\Psi_{1,2} = B_{1,2k} \exp(\pm \chi y + i(k_x x + k_z z - \varepsilon_k t / \hbar)), \quad (2)$$

где k_x, k_z – компоненты волнового вектора в направлении, параллельном границе раздела; $\chi = [k_x^2 + k_z^2 - (2m/\hbar^2)\varepsilon_k]^{1/2} > 0$.

На границе раздела $y = 0$ выполняется условие равенства волновых функций, а производные от волновых функций испытывают разрыв:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial \Psi_{1k}(0)}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_{2k}(0)}{\partial y} \right) = -U_0 \Psi_{1k}(0); \quad (3)$$

$$\Psi_{1k}(0) = \Psi_{2k}(0).$$

Отсюда следует: $\hbar^2 \chi / m_e = V_0$. Волновая функция нормирована так, что $\sum_{k=-\infty}^{\infty} \Psi_k^* \Psi_k = N_0 \exp(-2\chi|y|)$; N_0 – плотность частиц.

Частота плазменных колебаний 2D электронов равна

$$\omega_s^2 = \frac{4\pi e^2 N_0 d |q_x|}{m_e (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}; \quad d = \frac{1}{\chi}; \quad |q_x| d \ll 1. \quad (4)$$

Если предположить, что $\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - \frac{\omega_{0i}^2}{\omega^2}$, частота поверхностных плазменных колебаний имеет вид

$$\omega_s = \frac{\Omega_s}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^{1/2}}; \quad \Omega_s = \sqrt{\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2 + \omega_0^2 d |q_x|};$$

$$\omega_0^2 = \frac{4\pi e^2 N_0}{m_e} \quad (5)$$

Проведя стандартную процедуру квантования энергии электромагнитного поля поверхностных плазмонов, получим выражение для оператора вектора- потенциала:

$$\hat{A}_\alpha(\vec{r}, t) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} \left(\frac{4\pi\hbar c}{V\omega_s(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right)^{1/2} e_i \exp(i\vec{q}_i \vec{r}) (\hat{a}_{\vec{q}}(t) + \hat{a}_{-\vec{q}}^+(t)), \quad (6)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ не обладают частотной дисперсией.

Предположим далее, что через слой проходит (инжектируется) внешний поток заряженных частиц (электронов). Для нахождения матричных элементов гамильтониана взаимодействия плазмонов с этим потоком воспользуемся следующим выражением:

$$\hat{H}^{int} = -\frac{1}{c} \int \hat{j}(\vec{r}, t) \cdot \hat{A}(\vec{r}, t) d\vec{r}, \quad (7)$$

где $\hat{j} = e\hbar/(2im) \sum_{\rho=1}^3 (\hat{\Psi}_\rho^+ \vec{\nabla} \hat{\Psi}_\rho - \vec{\nabla} \hat{\Psi}_\rho^+ \hat{\Psi}_\rho)$ – оператор

плотности полного электронного тока (включающего падающий ($\rho = 1$), отраженный ($\rho = 3$) и прошедший ($\rho = 2$) токи; m – эффективная масса инжектируемого электрона. Здесь операторы волновых функций имеют вид:

$$\begin{aligned} \hat{\Psi}_1 &= \sum_k e^{ik_y y} \hat{\Psi}_k(x, z, t); & \hat{\Psi}_2 &= \sum_k \alpha_k e^{-ik_y y} \hat{\Psi}_k(x, z, t); \\ \hat{\Psi}_3 &= \sum_k \beta_k e^{ik_y y} \hat{\Psi}_k(x, z, t); & & \\ \hat{\Psi}_k(x, z, t) &= \frac{\hat{b}_k(t)}{\sqrt{V}} e^{i(k_x x + k_z z)}, \end{aligned} \quad (8)$$

$\hat{b}_k^+(t) = \hat{b}_k^+(0) \exp(i(\varepsilon_h / \hbar)t)$ и $\hat{b}_k(t) = \hat{b}_k(0) \exp(-i(\varepsilon_h / \hbar)t)$ – операторы рождения и уничтожения электронов; V – объем системы. Закон дисперсии электронов предполагается квадратичным:

$$E_k = \frac{\hbar^2(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)}{2m_0}.$$

Коэффициенты α_k и β_k находятся из граничных условий для функций $\hat{\Psi}_{1,2,3}$ и имеют вид:

$$\alpha_k = \frac{i\hbar^2 k_y}{m U_0 + i\hbar^2 k_y}; \quad \beta_k = \frac{-m V_0}{m V_0 + i\hbar^2 k_y}. \quad (9)$$

Оператор энергии взаимодействия частиц с плазмонами запишется:

$$\hat{H}^{int} = \sum_{\vec{k}'\vec{k}} W^{(p)}_{\vec{k}'\vec{k}} \hat{b}_{\vec{k}'}^+ (\hat{a}_{\vec{q}}(t) + \hat{a}_{-\vec{q}}^+(t)) \hat{b}_{\vec{k}}(t),$$

где $W_{\vec{k}'\vec{k}}$ – матричный элемент гамильтониана взаимодействия определяется выражениями:

$$W^{(1)}_{\vec{k}'\vec{k}} = F \frac{k'_y + k_y + i(k'_x + k_x)}{k'_y - k_y + i|q_x|}; \quad (10)$$

$$W^{(2)}_{\vec{k}'\vec{k}} = F \frac{k'_y + k_y - i(k'_x + k_x)}{k'_y - k_y - i|q_x|} \alpha_{k'}^* \alpha_k; \quad (11)$$

$$W^{(3)}_{\vec{k}'\vec{k}} = F \frac{k'_y + k_y - i(k'_x + k_x)}{k'_y - k_y - i|q_x|} \beta_{k'}^* \beta_k; \quad (12)$$

$$F = \frac{e}{m V} \left[\frac{\pi |q_x| \hbar^3}{2\omega_q (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right]^{1/2}.$$

Кинетическое уравнение принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_q}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{\vec{k}\vec{k}'} |W_{\vec{k}\vec{k}'}|^2 & \left[N_{\vec{q}} + 1 \right] n_{\vec{k}}^{(p)} (1 - n_{\vec{k}'}^{(p)}) - \\ & - N_{\vec{q}} n_{\vec{k}'}^{(p)} (1 - n_{\vec{k}}^{(p)}) \times \delta(E_{\vec{k}'} - E_{\vec{k}} - \hbar\omega_{\vec{q}}). \end{aligned} \quad (13)$$

Полагая, что распределение частиц описывается выражением

$$n_{\vec{k}}^{(p)} = (2\pi)^3 n_p \delta(k_x) \delta(k_y - k_p) \delta(k_z),$$

где $n_2 = |\alpha_k|^2 n_1$; $n_3 = |\beta_k|^2 n_1$; $k_1 = k_2 = k_0$; $k_3 = -k_0$ и

принимая во внимание неравенство: $\frac{\hbar^2 k_0^2}{2} \gg \hbar\omega_q$,

получим следующее выражение для инкремента $\gamma = \frac{\partial N_q}{N_q \partial t}$ поверхностных плазмонов в 2D электронном газе:

$$\gamma = \frac{\partial N_q}{N_q \partial t} = \frac{\omega_b^2 |q_x| v_0}{2\Omega_s} (1 + R^3 + D^3), \quad (14)$$

где $R = |\beta_k|^2$ – коэффициент отражения частиц от барьера, $D = |\alpha_k|^2$ – коэффициент прохождения частиц через барьер.

Если подставить в формулу (14) значения R, D через k_0, χ и ввести обозначение $\frac{Z^2}{k_0^2} = \eta$ получим

$$\gamma = \frac{\omega_b^2 |q_x| v_0}{\Omega_s} Z, \quad \text{где } Z = 1 - \frac{3}{2} \frac{\eta^2}{(1+\eta)^4}.$$

В тоже время из формулы (6) (где $\chi = \frac{2m_e U_0 a}{\hbar^2}$) следует, что

$$\gamma = \frac{\omega_b^2 |q_x| v_0}{\Omega_s} Y \quad \text{где } Y = \frac{1}{1+\eta}.$$

Таким образом, потенциальный барьер проявляет себя совершенно различным способом в случаях, когда процесс взаимодействия плазмонов и электронов детерминирован или носит характер случайных столкновений.

При $\eta = 0$ выражения для инкрементов совпадают: $Z = Y = 1$. Далее с ростом η функция Y убывает и при $\eta \rightarrow \infty$ она обращается в нуль. Функция Z проходит через минимум при $\eta = 1$, а при $\eta \rightarrow \infty$ она обращается в единицу, т.е оказывается менее чувствительной к потенциальному барьеру.

При нахождении инкрементов неустойчивости из кинетических уравнений в условиях $k_0^2 \gg \frac{\omega^2}{v_0^2}$, мы

рассматривали только процесс рассеяния электронов на потенциале поверхностного плазмона только «вперед» по ходу движения частицы и пренебрегали процессом рассеяния «назад». Сравним величину матричных элементов для этих процессов, воспользовавшись формулой (10).

$$\text{Рассмотрим множитель } C = \frac{k'_y + k_y + i(k'_x + k_x)}{k'_y - k_y + i|q_x|}$$

при F в формуле (12).

Положим $k_y = k_0$, $k_x = 0$, $k'_x = q_x$. Волновой вектор k'_y рассеянного вперед электрона равен $k'_y = k_0 \pm \frac{\omega}{v_0}$. Тогда имеем: $|C_1|^2 = \frac{4k_0^2 v_0^2}{\omega^2}$, так как

$$q_x^2 \ll \frac{\omega^2}{v_0^2}; \quad k_0^2 \gg q_x^2.$$

Волновой вектор электрона рассеянного назад равен $k'_y = -\left(k_0 \pm \frac{\omega}{v_0}\right)$.

При этом получим: $|C_2|^2 = \frac{\omega^2}{4k_0^2 v_0^2}$. Видно, что

$$\left|\frac{C_2}{C_1}\right|^2 = \frac{\omega^4}{16k_0^4 v_0^4} \ll 1. \quad (15)$$

В заключение отметим, что если кинетическая энергия электрона меньше энергии поверхностного плазмона, то имеет место процесс поглощения энергии поверхностных колебаний. Оценим величину декремента плазмонов при их взаимодействии с моноэнергетическим потоком заряженных частиц, воспользовавшись выражениями (8), (9) и пренебрегая влиянием потенциального барьера на границе раздела сред. Тогда ω_s определяется формулой (5.58), а кинетическое уравнение для плазмонов имеет вид:

$$\frac{\partial N_q}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} N_q n_0 \sum_{k_y} |W|^2 \delta(E_k - \frac{\hbar^2 k_0^2}{2m} - \hbar \omega_s). \quad (16)$$

Здесь матричный элемент

$|W| = |W_{k_0 \bar{q} \bar{k}}^{(1)}| + |W_{k_0 \bar{q} \bar{k}}^{(2)}|$ можно положить равным $2F$, так как волновой вектор рассеянного электрона $k'_y = \pm k_+$ является наибольшим слагаемым в выражениях (5.62) и (5.63). Подставляя в (5.70) значение $|W|^2$ и заменяя суммирование интегрированием находим декремент:

$$\gamma = -\frac{\omega_b^2 |q_x|}{\omega_s k_+ (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}. \quad (17)$$

где $k_+ = \sqrt{k_0^2 + \frac{2m\omega_s}{\hbar}}$.

Видно, что с ростом k_0 абсолютное значение декремента уменьшается и вблизи некоторого порогового значения $k_0^2 > \frac{2m\omega_s}{\hbar}$ обращается в нуль. Дальнейшее увеличение k_0 приводит к изменению знака γ и инкремент при $k_0^2 \gg \frac{2m\omega_s}{\hbar}$ приобретает вид $\gamma \approx \frac{\omega_b^2 |q_x| v_0}{\Omega_s}$.

Для развития неустойчивости необходимо, чтобы величина γ превосходила затухание плазмонов, обусловленное процессами рассеяния электронов на различных объектах: примесях, фононах и др. Затухание

плазмонов, вызванное этими процессами, равно $\nu/2$, где ν – наибольшая характерная частота релаксации импульса электронов. Кроме того, необходимо, чтобы длина свободного пробега электронов в потоке превосходила глубину проникновения поверхностного плазмона.

Приведем численные оценки для гетероструктуры $Al_x Ga_{1-x} As - GaAs - Al_x Ga_{1-x} As$ с двумерным электронным газом на границе раздела сред при $k_0^2 \gg \frac{2m\omega_s}{\hbar}$. При $\Omega_s = 10^{12} \text{ c}^{-1}$, $d \sim 2 \cdot 10^{-7} \text{ см}$

$q_x \approx 10^5 \text{ см}$, $v_0 \sim 10^7 \text{ см}$, $\frac{\omega_b^2}{\Omega_s^2} \approx 0,1$ инкремент достигает величины $0,1\Omega_s$, что превосходит $\nu \leq 10^{11} \text{ c}^{-1}$.

Выводы

1. Исследованы механизмы взаимодействия потока заряженных частиц с собственными электромагнитными колебаниями двумерного электронного газа, возникновение которого обусловлено наличием потенциального барьера на границе раздела сред. Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа электромагнитных колебаний такой системы, приведено выражение для инкремента их неустойчивости.

2. Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа поверхностных плазмонов при их взаимодействии с потоком заряженных частиц, пересекающих границу раздела сред с неоднородным потенциалом. Приведено его решение, позволяющее определять влияние величины барьера на инкремент неустойчивости поверхностных колебаний; вклад в величину инкремента прошедшей и отраженной компонент потока частиц.

3. Определены механизмы влияния границы на взаимодействие поверхностных электромагнитных колебаний и электронов при наличии потенциального барьера. В качестве объектов исследований рассмотрены поверхностные плазмоны и собственные электромагнитные колебания двумерного электронного слоя.

4. Проведен сравнительный анализ неустойчивостей данных типов колебаний в условиях, когда взаимодействие волн и частиц носит случайный и детерминированный характер. Показано, что различия в выражениях для инкрементов связаны с изменением размеров области взаимодействия волн и частиц. Установлены различия влияния потенциального барьера на величину инкремента в случаях, когда процесс взаимодействия поверхностных плазмонов и заряженных частиц детерминирован или носит характер случайных столкновений.

Список литературы: 1. Белецкий Н.Н. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / Н.Н. Белецкий, В.М. Светличный, Д.Д. Халамейда, В.М. Яковенко. – Киев.: Наукова думка, 1991. – 216 с. 2. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. Стилл М. Взаимодействие волн в плазме твердого тела / М. Стилл, Б. Вюраль. – М.:

Атомиздат, 1973. – 312 с. **4.** *Мырова Л.О.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / *Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко.* – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. **5.** *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов / *С. Зи.* – М.: Мир, 1984. – 456 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.* Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / *В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 154–161. **8.** *Кравченко В.И.* Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / *В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 161–169. **9.** *Кравченко В.И.* Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий / *В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83–89. **10.** *Кравченко В.И.* Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / *В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89–96. **11.** *Кравченко В.И.* Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / *В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103. **12.** *Кравченко В.И.* Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / *В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 103–111.

Bibliography (transliterated): 1. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jelektromagnitnyje

javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovoyh strukturah. Kiev: Naukova dumka. 1991. 216 p. **5.** *Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A.* Jelektromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz'. 1979. 225 p. **3.** *Stil M., Vjural' B.* Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p. **4.** *Myrova L.O., Chepizhenko A.Z.* Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 p. **5.** *Zi S.* Fizika poluprovodnikovoyh priborov. Moscow: Mir. 1984. 456 p. **6.** *Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vlijanie storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovoyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. pp. 62–69. **7.** *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vozbuzhdenie jelektromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 154–161. **8.** *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Generacija jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnogo jelektromagnitnogo vozdejstvija. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 161–169. **9.** *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vlijanie potoka zarjzhenykh chastic. Navedennogo vneshnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovoyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 83–89. **10.** *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vlijanie storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 89–96. **11.** *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovoyh stuktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 96–103. **12.** *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovoyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 103–111.

Поступила (received) 03.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-33

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of NIPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33.

Серков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Serkov Aleksandr Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-39, e-mail : bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Яценко Ирина Леонидовна – ассистент кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-39, e-mail: irina.kira@mail.ru

Yatsenko Irina Leonidovna – Assistant of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: irina.kira@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physico-Matematic Sciences, Professor, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 621.318

В. И. КРАВЧЕНКО, А. А. СЕРКОВ, В. С. БРЕСЛАВЕЦ, И. Л. ЯЦЕНКО, И. В. ЯКОВЕНКО

ВЛИЯНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА НА ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМОНОВ И ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД

Определены вероятности процессов излучения и поглощения энергии электромагнитных колебаний электронами пучка на границе проводящего твердого тела с учетом потенциального барьера конечной величины, рассмотрена возможность развития неустойчивости колебаний. Учтено влияние конечной величины потенциального барьера на механизм обмена энергией волн и частиц на границе. Получены кинетические уравнения, определяющие изменение числа поверхностных плазмонов, выражения для инкрементов их неустойчивостей с учетом величины потенциального барьера на границе, которую пересекает поток заряженных частиц. Данные результаты позволяют учитывать вклад отраженной и прошедшей компонент потока частиц в суммарную энергию излучения поверхностных колебаний.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, кинетические неустойчивости, потенциальный барьер, поток заряженных частиц, генерация, черенковское и переходное излучение, поверхностные волны, проводящее твердое тело, энергия излучения.

Введение. При рассмотрении механизмов кинетических неустойчивостей электромагнитных колебаний, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц, пересекающих поверхность проводящего твердого тела, обычно предполагается, что высота потенциального барьера на границе раздела равна нулю или бесконечности. Вместе с тем вопрос о влиянии его конечной величины на механизм обмена энергией волн и частиц на границе заслуживает особого внимания. Авторами [117] определены вероятности процессов излучения и поглощения энергии электромагнитных колебаний электронами пучка на границе проводящего твердого тела с учетом потенциального барьера конечной величины, однако возможность развития неустойчивости не рассматривалась.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния потенциального барьера на механизмы развития пучковых неустойчивостей.

В ней получены кинетические уравнения, определяющие изменение числа поверхностных плазмонов, выражения для инкрементов их неустойчивостей с учетом величины потенциального барьера на границе, которую пересекает поток заряженных частиц. Данные результаты позволяют учитывать вклад отраженной и прошедшей компонент потока частиц в суммарную энергию излучения поверхностных колебаний.

Основные результаты. Пусть на границе двух плазмopodobных сред существуют поверхностные волны с законом дисперсии:

$$q_x^2 = \frac{\omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{c^2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}; \quad q_{cy}^2 = \frac{\omega^2 \varepsilon_i^2}{c^2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}; \quad \alpha = 1, 2, \quad (1)$$

$$\varepsilon_1(\omega) + \varepsilon_2(\omega) < 0; \quad \varepsilon_1(\omega) \varepsilon_2(\omega) < 0.$$

Здесь q_x – волновой вектор, направленный вдоль границы $y = 0$, ω – частота волны, $\varepsilon_i(\omega) = \varepsilon_{0i} - \frac{\omega_{0i}^2}{\omega^2}$

– диэлектрическая проницаемость среды, ε_{0i} – диэлектрическая постоянная кристаллической решетки, ω_{0i} – ленгмюровская частота.

Волна поляризована так, что отличны от нуля $E_x E_y$ – компоненты электрического поля и H_z – маг-

нитного. При этом $E_x, E_y, H_z \sim \exp i(q_x x + q_y y - \omega t)$.

Если пренебречь эффектом запаздывания: $c \rightarrow \infty$, то получим спектр колебаний поверхностных плазмонов:

$$\varepsilon_1(\omega) + \varepsilon_2(\omega) = 0; \quad q_y^2 = -q_x^2. \quad (2)$$

Предположим далее, что границу раздела сред пересекает квазинейтральный поток заряженных частиц, движущихся вдоль оси y из среды «1» ($y \leq 0$) в среду «2» ($y > 0$). Форма потенциального барьера имеет вид:

$$U(y) = 0; \quad -\infty < y < 0,$$

$$U(y) = U_0; \quad < y \geq 0.$$

Волновые функции для падающей – Ψ_1 , прошедшей – Ψ_2 и отраженной – Ψ_3 частиц пучка представляют собой решения уравнений Шредингера в каждой из сред и записываются следующим образом:

$$\Psi_1 = \frac{1}{\sqrt{V}} \exp i(\vec{k}_1 \vec{r} - \omega_{k1} t); \quad \Psi_2 = \frac{\alpha_{k2}}{\sqrt{V}} \exp i(\vec{k}_2 \vec{r} - \omega_{k1} t); \quad (3)$$

$$\Psi_3 = \frac{\beta_{k3}}{\sqrt{V}} \exp i(\vec{k}_3 \vec{r} - \omega_{k1} t).$$

$$k_{1y} = \left(\frac{2mE_{k1}}{\hbar^2} - k_{1x}^2 - k_{1z}^2 \right)^{1/2};$$

$$k_{2y} = \left(\frac{(2mE_{k1} - U_0)}{\hbar^2} - k_{1x}^2 - k_{1z}^2 \right)^{1/2}; \quad k_{3y} = -k_{1y};$$

$E_{k1} = \hbar \omega$; $\vec{k}_{1,2,3}$ – соответственно энергия и волновые вектора падающей, прошедшей и отраженной частицы, V – объем системы. Коэффициенты прохождения и отражения для волновых функций определяются из граничных условий для волновых функций и их производных на границе:

$$\alpha_{k2} = \frac{2k_{1y}}{k_{1y} + k_{2y}}; \quad \beta_{k3} = \frac{k_{3y} + k_{2y}}{k_{3y} - k_{2y}}. \quad (4)$$

Определим гамильтониан взаимодействия $\hat{H}^{(int)}$ поверхностных плазмонов следующим образом:

$$\hat{H}^{(int)} = \frac{1}{c} \int \hat{j}(r, t) \hat{A}(r' t) dr; \quad (5)$$

$$\hat{a}_q^+(t) = a_q^+ \exp(-i\omega t); \quad \hat{a}_q(t) = a_q \exp(-i\omega t);$$

$$\begin{aligned} \omega_q &= \omega_{-q}; \quad S = L_x L_z; \quad |e_\alpha| = 1; \\ e_{1x} &= e_{2x} = \frac{q_x}{|q_x|} \frac{1}{\sqrt{2}}; \quad e_{1y} = -e_{2y} = -\frac{i}{\sqrt{2}}; \\ e_{1z} &= e_{2z} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

$\hat{a}_q^+; \hat{a}_q^-$ – відповідно оператори рождження і унічтоження плазмонів.

Оператор плотности тока представим через операторы рождження \hat{b}_k^+ и уничтожения \hat{b}_k^- электронов.

Для падающих, прошедших и отраженных частиц оператор плотности тока имеет вид:

$$\hat{j}_1 = \frac{e\hbar}{2mV} \sum_{k_1 \bar{k}_1} (\vec{k}_1 + \vec{k}_1') b_{k_1}^+(t) b_{\bar{k}_1}^-(t) \exp(i(\vec{k}_1 - \vec{k}_1') \vec{r}); \quad y < 0. \quad (7)$$

$$\hat{j}_2 = \frac{e\hbar}{2mV} \sum_{k_2 \bar{k}_2} (\vec{k}_2 + \vec{k}_2') \alpha_{k_2} b_{k_2}^+(t) b_{\bar{k}_2}^-(t) \exp(i(\vec{k}_2 - \vec{k}_2') \vec{r}); \quad y > 0. \quad (8)$$

$$\hat{j}_3 = \frac{e\hbar}{2mV} \sum_{k_3 \bar{k}_3} (\vec{k}_3 + \vec{k}_3') \beta_{k_3} b_{k_3}^+(t) b_{\bar{k}_3}^-(t) \exp(i(\vec{k}_3 - \vec{k}_3') \vec{r}); \quad y < 0. \quad (9)$$

где $\hat{b}_k^+(t) = \hat{b}_k^+ \exp(i\omega t)$; $\hat{b}_k^-(t) = \hat{b}_k^- \exp(-i\omega t)$.

Предполагается, что среды «1» и «2» продолжены на все пространство. Тогда суммирование производится по всем составляющим волнового вектора $k = (k_x, k_y, k_z)$.

Базисные волновые функции для прошедших и отраженных частиц взяты с соответствующими коэффициентами, так что на границе выполняются условия (4). Плотности токов, создаваемых частицами, запишутся как суммы диагональных матричных элементов их операторов:

$$\vec{j}_i = \langle n_{ki} | \hat{j}_i | n_{ki} \rangle, \quad (10)$$

где $\langle n_{ki} |, |n_{ki} \rangle$ – векторы состояний; $\langle n_{ki} | n_{ki} \rangle = \delta_{kk'}$; $n_{ki} = (0, 1) - \vec{k}$. В результате получим:

$$\begin{aligned} \hat{j}_1 &= \frac{e\hbar}{mV} \sum_{k_1 y > 0} \vec{k}_1 n_{k_1}; \quad \hat{j}_2 = \frac{e\hbar}{mV} \sum_{k_2 y > 0} \vec{k}_2 \alpha_{k_2}^2 n_{k_2}; \\ \hat{j}_3 &= \frac{e\hbar}{mV} \sum_{k_3 y > 0} \vec{k}_3 \beta_{k_3}^2 n_{k_3}. \end{aligned} \quad (11)$$

Необходимо иметь ввиду, что при суммировании по волновым векторам в выражениях для коэффициентов прохождения и отражения (4) подразумевается:

$$k_{1y} = \left(k_{2y}^2 + \frac{2mU_0}{\hbar^2} \right)^{1/2}; \quad k_{2y} = \left(k_{3y}^2 - \frac{2mU_0}{\hbar^2} \right)^{1/2}.$$

Таким образом $\alpha_{k_1} b_{k_1}^+; \alpha_{k_2} b_{k_2}^+; \beta_{k_3} b_{k_3}^+; \beta_{k_3} b_{k_3}^+$ – операторы рождження и уничтожения прошедших и отраженных частиц. Плотности числа частиц определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \bar{n}_1 &= \langle n_{ki} | b_{k_1}^+ b_{k_1} | n_{ki} \rangle; \quad \bar{n}_2 = \langle n_{ki} | \alpha_{k_2}^* b_{k_2}^+ b_{k_2} \alpha_{k_2} | n_{ki} \rangle; \\ \bar{n}_3 &= \langle n_{ki} | \beta_{k_3}^* b_{k_3}^+ b_{k_3} \beta_{k_3} | n_{ki} \rangle; \\ \alpha_{k_2}^* &= \alpha_{k_2}; \quad \beta_{k_3}^* = \beta_{k_3}. \end{aligned} \quad (12)$$

Число падающих частиц равно сумме прошедших и отраженных частиц, при равных объемах имеем $\bar{n}_1 = \bar{n}_2 + \bar{n}_3$. Оператор энергии взаимодействия $H^{(int)}$ запишется через матричный элемент $W_{k_i q k_i}^{(i)}$ следующим образом:

$$H^{(int)} = \sum_{i=1}^3 \sum_{k_i q k_i} W_{k_i q k_i}^{(i)} [a_q^+(t) + a_{-q}(t)] b_{k_2}^+(t) b_{k_2}^-(t); \quad (13)$$

$$W_{k_i q k_i}^{(1)} = F \frac{\vec{e}_1 (\vec{k}_1 + \vec{k}_1')}{q_x + i(k_{1y} - k_{1y}')} ; \quad (14)$$

$$W_{k_i q k_i}^{(2)} = F \frac{\vec{e}_1 (\vec{k}_2 + \vec{k}_2')}{q_x + i(k_{2y} - k_{2y}')} ; \quad (15)$$

$$W_{k_i q k_i}^{(3)} = F \frac{\vec{e}_1 (\vec{k}_3 + \vec{k}_3')}{q_x + i(k_{3y} - k_{3y}')} ; \quad (16)$$

$$F = \left[\frac{\pi^2 \hbar^3 |q_x| S}{\omega_q (\epsilon_{01} + \epsilon_{01})} \right]^{1/2}.$$

Квадрат матричного элемента определяет вероятности переходов между состояниями $k \rightarrow k'$ для падающих, прошедших и отраженных частиц. Поскольку свойства среды неоднородны вдоль оси Oy , то закон сохранения импульсов электронов и плазмонов выполняется только для тангенциальных составляющих $k_x + q_x = k_x'$; $k_z = k_z'$. Из выражений (10) – (12) видно, что матричные элементы удовлетворяют условию обратимости прямого и обратного переходов

$$W_{k_i - q k_i} = W_{k_i q k_i}^*.$$

Учитывая процессы излучения и поглощения плазмонов в каждой среде, получим кинетическое уравнение, описывающее изменение числа плазмонов N_q в состоянии с волновым вектором q :

$$\begin{aligned} \frac{dN_q}{dt} &= \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{i=1}^3 \sum_{k_i k_i'} |W_{k_i q k_i'}|^2 \left[(N_q + 1) n_{k_i} (1 - n_{k_i}') - \right. \\ &\quad \left. - N_q n_{k_i} (1 - n_{k_i}') \right] \times \delta(E - E^{(i)} + \hbar\omega). \end{aligned} \quad (17)$$

Первое слагаемое в квадратной скобке описывает процесс спонтанного и индуцированного излучения плазмонов при переходе электронов из состояния k' в состояние k , второе – процессы поглощения при обратных переходах.

Выражение $\delta(E - E^{(i)} + \hbar\omega)$ определяет закон сохранения энергии. Из уравнения (17) при учете лишь процессов индуцированного излучения и поглощения волн частицами можно определить инкремент (декремент) плазменных колебаний $\gamma = \frac{1}{2N_q} \frac{dN_q}{dt}$; $N_q \gg 1$.

Предположим, что падающие, прошедшие и отраженные частицы описываются максвелловской функцией распределения, максимум которой сдвинут в точку k_0

$$n_{ki} = \frac{n_{ob} (2\pi\hbar)^3}{(2\pi m T)^{3/2}} \exp \left(-\frac{\hbar^2 (k_{iy} - k_{oi})^2}{2mT} \right) \exp \left(-\frac{\hbar^2 (k_x^2 + k_z^2)}{2mT} \right), \quad (18)$$

где n_{ob} – плотность частиц в пучке, T – температура электронов. Если энергия плазмона больше ширины энергетического уровня $\hbar\omega \gg T$, то

$$n_{ki} = (2\pi)^3 n_o \delta(k_{iy} - k_{0y}) \delta(k_x) \delta(k_z).$$

Заменяя суммирование в формуле (7) интегрированием, получим величину инкремента, выраженную через матричные элементы:

$$\gamma = \frac{n_o L V \omega}{\hbar m} \sum_{i=3}^3 \frac{|W^{(i)}|^2}{v_{0i}^3}, \quad (19)$$

где $v_{0i} = \frac{\hbar |k_{0i}|}{m}$ – скорости падающих прошедших и отраженных частиц: $v_{01} = v_{03}$, $v_{02} = \left(v_{01}^2 - \frac{2U_0}{m} \right)$.

Матричные элементы $W^{(i)}$ представляют собой выражения (14) – (16) в которых произведена замена:

$$\left| k_{0i} - k_{0i}^{(0)} \right| = \frac{\omega}{v_{0i}}; \quad \alpha_{k2}^{(0)} \approx \alpha_{k2} = \frac{2v_{01}}{v_{01} + v_{02}};$$

$$\beta_{0i}^{(0)} \approx \beta_{0i} = \frac{v_{01} - v_{02}}{v_{01} + v_{02}}.$$

Таким образом окончательно получим [6]:

$$\gamma = \frac{\omega_u^2 |q_x| v_{01}}{2\omega_q^2 (\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02})} \left(1 + R + \frac{v_{01}}{v_{02}} D \right)^2, \quad (20)$$

где $R = \left(\frac{v_{01} - v_{02}}{v_{01} + v_{02}} \right)^2$ – коэффициент отражения частиц; $D = 1 - R$ – коэффициент прохождения.

Если ширина уровня энергии электрона превосходит энергию плазмона, тогда количество электронов состояниях k , $k^{(0)}$ связаны соотношением:

$$n_{k^{(0)}} = n_k + \frac{\omega}{v_0} \frac{dn_k}{dk_y}.$$

Можно показать, что поверхностные плазмоны в этом случае затухают при взаимодействии с потоком заряженных частиц, поскольку фазовый объем, занимаемый частицами при поглощении плазмон, превосходит таковой для излучающих частиц.

Выводы

Определены вероятности процессов излучения и поглощения энергии электромагнитных колебаний электронами пучка на границе проводящего твердого тела с учетом потенциального барьера конечной величины.

Получены кинетические уравнения, определяющие изменение числа поверхностных плазмонов, выражения для инкрементов их неустойчивостей с учетом величины потенциального барьера на границе, которую пересекает поток заряженных частиц. Полученные результаты позволяют учитывать вклад отраженной и прошедшей компонент потока частиц в суммарную энергию излучения поверхностных колебаний.

В работе учтено влияние потенциального барьера не только на поведение заряженных частиц потока, пересекающего границу, но и на спектральные характеристики плазموподобных структур.

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

Список литературы: 1. Белецкий Н.Н. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / Н.Н. Белецкий, В.М. Светличный, Д.Д. Халамейда, В.М. Яковенко. – Киев.: Наукова думка, 1991. – 216 с. 2. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. Стил М. Взаимодействие волн в плазме твердого тела / М. Стил, Б. Вюраль. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с. 6. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 11. – С. 62–69. 7. Кравченко В.И. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 154–161. 8. Кравченко В.И. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 161–169. 9. Кравченко В.И. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83–89. 10. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89–96. 11. Кравченко В.И. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103. 12. Кравченко В.И. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 103–111.

Bibliography (transliterated): 1. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jeletromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovovyh strukturah. Kiev: Naukova dumka. 1991. 216 p. 5. 2. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Jeletromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz'. 1979. 225 p. 3. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p. 4. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jeletromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 p. 5. Zi S. Fizika poluprovodnikovovyh priborov. Moscow: Mir. 1984. 456 p. 6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jeletromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovovyh komplektujushhij jeletroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. pp. 62–69. 7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jeletromagnitnyh kolebanij v 2-D jeletronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 154–161. 8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jeletromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jeletromagnitnogo vozdejstvija. Vestnik NTU

"KhPI". 2012. No 21. pp. 161–169. **9.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vnesnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodneye karakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhih jelektorradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 83–89. **10.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodneye karakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 89–96. **11.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij

poluprovodnikovyh stuktur jelektorradioizdelij v uslovijah vozdeystvija storonnego jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 96–103. **12.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodeystvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh stuktur v uslovijah vozdeystvija storonnego jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 103–111.

Поступила (received) 10.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-33

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of NIPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33.

Серков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Serkov Aleksandr Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-39, e-mail : bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Яценко Ирина Леонидовна – ассистент кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-39, e-mail: irina.kira@mail.ru

Yatsenko Irina Leonidovna – Assistant of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: irina.kira@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physico-Matematic Sciences, Professor, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 621.318

В. И. КРАВЧЕНКО, А. А. СЕРКОВ, В. С. БРЕСЛАВЕЦ, И. Л. ЯЦЕНКО, И. В. ЯКОВЕНКО

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрено взаимодействие поверхностных плазмонов с потоком заряженных частиц при наличии потенциального барьера, исходя из энергетического принципа получены кинетические уравнения, определяющие изменение числа поверхностных плазмонов, выражения для инкрементов их неустойчивостей с учетом величины потенциального барьера на границе, который приводит к появлению отраженных от границы частиц пучка. Полученные результаты позволяют учитывать вклад отраженной и прошедшей компонент потока частиц в суммарную энергию излучения поверхностных колебаний. Исследованы механизмы взаимодействия потока заряженных частиц с собственными электромагнитными колебаниями двумерного электронного газа, возникновение которого обусловлено наличием потенциального барьера на границе раздела сред.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, кинетические неустойчивости, потенциальный барьер, поток заряженных частиц, генерация, черенковское и переходное излучение, поверхностные волны, проводящее твердое тело, энергия излучения

Введение. Настоящая работа посвящена исследованию влияния потенциального барьера на механизмы развития пучковых неустойчивостей. При рассмотрении взаимодействия электромагнитных колебаний и заряженных частиц в настоящей работе помимо вероятностного подхода (кинетических уравнений) использовалась также другая методика, позво-

ляющая установить взаимосвязь между электромагнитными полями поверхностных колебаний и волновыми функциями электронов потока на границе. Она обеспечивается с помощью уравнения Шредингера и дополнительных (по сравнению с электродинамическими) граничных условий для возмущенных волновых функций электронов пучка. При этом амплитуды

"KhPI". 2012. No 21. pp. 161–169. **9.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vnesnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodneye karakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhih jelektorradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 83–89. **10.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodneye karakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 89–96. **11.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij

poluprovodnikovyh stuktur jelektorradioizdelij v uslovijah vozdeystvija storonnego jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 96–103. **12.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodeystvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh stuktur v uslovijah vozdeystvija storonnego jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 103–111.

Поступила (received) 10.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-33

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of NIPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33.

Серков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Serkov Aleksandr Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-39, e-mail : bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Яценко Ирина Леонидовна – ассистент кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-39, e-mail: irina.kira@mail.ru

Yatsenko Irina Leonidovna – Assistant of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: irina.kira@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physico-Matematic Sciences, Professor, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 621.318

В. И. КРАВЧЕНКО, А. А. СЕРКОВ, В. С. БРЕСЛАВЕЦ, И. Л. ЯЦЕНКО, И. В. ЯКОВЕНКО

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрено взаимодействие поверхностных плазмонов с потоком заряженных частиц при наличии потенциального барьера, исходя из энергетического принципа получены кинетические уравнения, определяющие изменение числа поверхностных плазмонов, выражения для инкрементов их неустойчивостей с учетом величины потенциального барьера на границе, который приводит к появлению отраженных от границы частиц пучка. Полученные результаты позволяют учитывать вклад отраженной и прошедшей компонент потока частиц в суммарную энергию излучения поверхностных колебаний. Исследованы механизмы взаимодействия потока заряженных частиц с собственными электромагнитными колебаниями двумерного электронного газа, возникновение которого обусловлено наличием потенциального барьера на границе раздела сред.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, кинетические неустойчивости, потенциальный барьер, поток заряженных частиц, генерация, черенковское и переходное излучение, поверхностные волны, проводящее твердое тело, энергия излучения

Введение. Настоящая работа посвящена исследованию влияния потенциального барьера на механизмы развития пучковых неустойчивостей. При рассмотрении взаимодействия электромагнитных колебаний и заряженных частиц в настоящей работе помимо вероятностного подхода (кинетических уравнений) использовалась также другая методика, позво-

ляющая установить взаимосвязь между электромагнитными полями поверхностных колебаний и волновыми функциями электронов потока на границе. Она обеспечивается с помощью уравнения Шредингера и дополнительных (по сравнению с электродинамическими) граничных условий для возмущенных волновых функций электронов пучка. При этом амплитуды

и фазы возмущенных волновых функций электрона определяются уже существующими амплитудой и фазой плазмона, так что взаимодействие волн и частиц носит детерминированный характер. Условия для волновых функций позволяют определить влияние границы (в частности наличие потенциального барьера) на величину инкремента неустойчивости.

В работе получены кинетические уравнения, определяющие изменение числа поверхностных плазмонов, выражения для инкрементов их неустойчивостей с учетом величины потенциального барьера на границе, который приводит к появлению отраженных от границы частиц пучка. Полученные результаты позволяют учитывать вклад отраженной и прошедшей компонент потока частиц в суммарную энергию излучения поверхностных колебаний.

Основные результаты. Рассмотрим взаимодействие поверхностных плазмонов с потоком заряженных частиц при наличии потенциального барьера, исходя из энергетического принципа [1].

Пусть границу раздела сред пересекает квазинейтральный поток заряженных частиц, движущихся вдоль оси y из среды «1» ($y \leq 0$) в среду «2» ($y > 0$). Форма потенциального барьера имеет вид:

$$\begin{aligned} U(y) &= 0; & -\infty < y < 0, \\ U(y) &= U_0; & 0 \leq y < \infty. \end{aligned} \quad (1)$$

Волновые функции для падающей – Ψ_1 , прошедшей – Ψ_2 и отраженной – Ψ_3 частиц пучка представляют собой решения уравнений Шредингера в каждой из сред и записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \Psi_{k_1}^{(1)} &= \frac{1}{\sqrt{V}} \exp i(\vec{k}_1 \vec{r} - \omega_{k_1} t); \\ \Psi_{k_2}^{(2)} &= \frac{\alpha_{k_2}}{\sqrt{V}} \exp i(\vec{k}_2 \vec{r} - \omega_{k_1} t); \\ \Psi_{k_3}^{(3)} &= \frac{\beta_{k_3}}{\sqrt{V}} \exp i(\vec{k}_3 \vec{r} - \omega_{k_1} t); \end{aligned} \quad (2)$$

$$k_{1y} = \left(\frac{2mE_{k_1}}{\hbar^2} - k_{1x}^2 - k_{1z}^2 \right)^{1/2}; \quad k_{2y} = \left(k_{1y}^2 - \frac{2mU_0}{\hbar^2} \right)^{1/2};$$

$$k_{3y} = -k_{1y}; \quad k_{3x} = k_{1x} = k_{3z}; \quad k_{1z} = k_{3z} = k_{1z};$$

$E_{k_1} = \hbar\omega_{k_1}$; $\vec{k}_{1,2,3}$ – соответственно энергия и волновые вектора падающей, прошедшей и отраженной частицы, V – объем системы. Коэффициенты прохождения и отражения для волновых функций определяются из граничных условий для волновых функций и их производных на границе:

$$\alpha_{k_2} = \frac{2k_{1y}}{k_{1y} + k_{2y}}; \quad \beta_{k_3} = \frac{k_{3y} + k_{2y}}{k_{3y} - k_{2y}}. \quad (3)$$

Плотности числа частиц и токов в пучке соответственно равны

$$n_i = \sum_{k_i} \Psi_{k_i}^{(i)} \Psi_{k_i}^{(i)*}; \quad \vec{j}_i = \frac{e\hbar}{m} \sum_{k_i} \vec{k}_i \Psi_{k_i}^{(i)} \Psi_{k_i}^{(i)*},$$

где суммирование проводится по всем состояниям падающих частиц.

При этом $\vec{j}_{y1} + \vec{j}_{y2} = \vec{j}_{y3}$ Если пучок частиц па-

дающих на границу имеет скорость $v_{01} = (0, v_{01}, 0)$; $v_{01} = \frac{\hbar k_{01}}{m}$, то получим следующие соотношения

$$\begin{aligned} n_1 &= n_0; \quad n_2 = \alpha_{k_0}^2 n_0; \quad n_3 = \beta_{k_0}^2 n_0; \quad \vec{j}_{y1} = e v_{01} n_0; \\ \vec{j}_{y2} &= e v_{02} n_2; \quad \vec{j}_{y3} = -e v_{01} n_3; \quad v_{02} = \frac{\hbar k_{02}}{m}; \\ \alpha_{k_0}^2 &= \frac{4v_{01}}{(v_{01} + v_{02})^2}; \quad \beta_{k_0}^2 = \frac{(v_{01} - v_{02})^2}{(v_{01} + v_{02})^2}; \\ v_{02} &= \left(v_{01}^2 - \frac{2mU_0}{\hbar^2} \right)^{1/2}; \quad v_{01}(1 - \beta_{k_0}^2) = v_{02} \alpha_{k_0}^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Определим гамильтониан взаимодействия $\hat{H}^{(int)}$ поверхностных плазмонов с потоком заряженных частиц следующим образом:

$$\hat{H}^{(int)} = -\frac{1}{c} \int \vec{j}(r, t) \hat{A}(r' t) dr, \quad (5)$$

где:

$$\begin{aligned} \hat{A}(r, t) &= \sum_q \left[\frac{4\pi^2 \hbar |q_x| c^2}{\omega_q S (\epsilon_{01} + \epsilon_{02})} \right]^{1/2} \vec{e}_\alpha [\hat{a}_q^+(t) + \hat{a}_{-q}(t)] \exp(i\vec{q}\vec{r}); \\ \hat{a}_q^+(t) &= \hat{a}_q^+ \exp(-i\omega t); \quad \hat{a}_{-q}(t) = \hat{a}_{-q} \exp(-i\omega t); \\ \omega_q &= \omega_{-q}; \quad S = L_x L_z; \quad |e_\alpha| = 1; \end{aligned} \quad (6)$$

$$e_{1x} = e_{2x} = \frac{q_x}{|q_x|} \frac{1}{\sqrt{2}}; \quad e_{1y} = -e_{2y} = -\frac{i}{\sqrt{2}}; \quad e_{1z} = e_{2z} = 0.$$

Оператор плотности тока $\hat{j}(r, t)$ представим через операторы рождения \hat{b}_k^+ и уничтожения \hat{b}_k электронов.

Для падающих, прошедших и отраженных частиц он имеет вид:

$$\hat{j}_1 = \frac{e\hbar}{2mV} \sum_{k_1 k'_1} (\vec{k}_1 + \vec{k}'_1) b_{k_1}^+(t) b_{k'_1}(t) \exp i(\vec{k}_1 - \vec{k}'_1) \vec{r}; \quad y < 0, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \hat{j}_2 &= \frac{e\hbar}{2mV} \sum_{k_2 k'_2} (\vec{k}_2 + \vec{k}'_2) \alpha_{k_2} b_{k_2}^+(t) b_{k'_2}(t) \alpha_{k_2} \times \\ &\times \exp i(\vec{k}_2 - \vec{k}'_2) \vec{r}; \quad y > 0, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \hat{j}_3 &= \frac{e\hbar}{2mV} \sum_{k_3 k'_3} (\vec{k}_3 + \vec{k}'_3) \beta_{k_3} b_{k_3}^+(t) b_{k'_3}(t) \beta_{k_3} \times \\ &\times \exp i(\vec{k}_3 - \vec{k}'_3) \vec{r}; \quad y < 0. \end{aligned} \quad (9)$$

где $\hat{b}_k^+(t) = \hat{b}_k^+ \exp(i\omega t)$; $\hat{b}_k(t) = \hat{b}_k \exp(-i\omega t)$.

Компоненты k'_i связаны между собой соотношениями (3).

Плотности токов, создаваемых частицами, запишутся как суммы диагональных матричных элементов их операторов:

$$\vec{j}_i = \langle n_{ki} | \hat{j}_i | n_{ki} \rangle, \quad (10)$$

где $\langle n_{ki} | | n_{ki} \rangle$ – векторы состояний; $\langle n_{ki} | n_{ki} \rangle = \delta_{kk'}$; $n_{ki} = (0, 1)$ – число электронов в состоянии k_i .

Оператор энергии взаимодействия $H^{(int)}$ запишется через матричный элемент $W_{kiqki}^{(i)}$ следующим образом:

$$H^{(int)} = \sum_{i=1}^3 \sum_{k_i q k_i} W_{k_i q k_i}^{(i)} \cdot [a_q^+(t) + a_{-q}(t)] b_{k_i}^+(t) b_{k_i}(t); \quad (11)$$

$$W_{k_1 q k_1}^{(1)} = F \frac{\vec{e}_1 (\vec{k}_1 + \vec{k}_1') \alpha_{k_2} \alpha_{k_2'}}{q_x + i(k_{1y} - k_{1y}')} ; \quad (12)$$

$$W_{k_2 q k_2}^{(2)} = F \frac{\vec{e}_2 (\vec{k}_2 + \vec{k}_2') \beta_{k_3} \beta_{k_3'}}{q_x - i(k_{2y} - k_{2y}')} ;$$

$$W_{k_3 q k_3}^{(3)} = F \frac{\vec{e}_3 (\vec{k}_3 + \vec{k}_3')}{q_x + i(k_{3y} - k_{3y}')} ; \quad (13)$$

$$F = \frac{e}{mV} \left[\frac{\pi \hbar^3 |q_x| S}{\omega_q (\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02})} \right]^{1/2}.$$

Квадрат матричного элемента определяет вероятности переходов между состояниями $k \rightarrow k'$ для падающих, прошедших и отраженных частиц. При этом, если волновой вектор k_y совпадает по направлению с волновым вектором k'_y , то матричный элемент описывает процесс рассеяния электрона вперед по ходу его движения. Если же эти векторы противоположны, то имеет место процесс рассеяния назад.

Из выражений (11-13) видно, что матричные элементы удовлетворяют условию обратимости прямого и обратного переходов: $W_{k_i - q k_i}^{(i)} = W_{k_i q k_i}^{(i)}$.

Учитывая процессы излучения и поглощения плазмонов в каждой среде, получим кинетическое уравнение, описывающее изменение числа плазмонов N_q в состоянии с волновым вектором q :

$$\frac{dN_q}{dt} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{i=1}^3 \sum_{k_i k_i'} |W_{k_i q k_i'}^{(i)}|^2 \left[(N_q + 1) n_{k_i} (1 - n_{k_i}) - N_q n_{k_i} (1 - n_{k_i}') \right] \times \delta(E_i - E_i' + \hbar\omega_q). \quad (14)$$

Изменение N_q вызвано взаимодействием поля плазмона с падающими ($i = 1$) прошедшими ($i = 2$) и отраженными ($i = 3$) частицами. Из уравнения (5.29) при учете лишь процессов индуцированного излучения и поглощения волн частицами можно определить инкремент (декремент) плазменных колебаний

$$\gamma = \frac{1}{2N_q} \frac{dN_q}{dt}; \quad N_q \gg 1. \text{ Предположим, что падающие,}$$

прошедшие и отраженные частицы описываются максвелловской функцией распределения, максимум которой сдвинут в точку k_{0i}

$$n_{k_i} = \frac{n_{0i} (2\pi\hbar)^3}{(2\pi m T)^{3/2}} \exp\left(-\frac{\hbar^2 (k_{iy} - k_{0i})^2}{2mT}\right) \exp\left(-\frac{\hbar^2 (k_x^2 + k_z^2)}{2mT}\right) \quad (15)$$

где n_{0i} – плотность частиц в пучке, T – температура электронов. Если энергия плазмона больше ширины энергетического уровня $\hbar\omega \gg T$, то

$$n_{k_i} = (2\pi)^3 n_i \delta(k_{iy} - k_{0iy}) \delta(k_x) \delta(k_z).$$

Иными словами, при малой ширине энергетического уровня электронного пучка по сравнению с энергией плазмона в уравнении (14) можно провести суммирование по всем состояниям частиц. В результате получим величину инкремента, выраженную через матричный элемент в следующем виде :

$$\gamma = \frac{2\pi m V}{\hbar} \sum_{k_{1y}} \sum_{i=3}^3 |W^{(i)}|^2 n_{0i} [\delta(k_{iy}^2 - k_{i-}^2) - \delta(k_{iy}^2 - k_{i+}^2)], \quad (16)$$

где $k_{i\pm}^2 = \left(k_{0i}^2 \pm \frac{2m\omega}{\hbar}\right)^{1/2}$, значение матричного элемен-

та берется в точках $k_i = (0, k_{0i}, 0)$, суммирование по положительным и отрицательным значениям волнового вектора описывает процессы рассеяния электронов вперед и назад относительно k_{0i} .

Если энергия электрона превосходит энергии плазмона и фазовая скорость волны превосходит скорость частиц то, заменяя суммирование в формуле (16) интегрированием, получим величину инкремента, выраженную через матричные элементы:

$$\gamma = \frac{n_0 L V \omega}{\hbar m} \sum_{i=3}^3 \frac{|W^{(i)}|^2}{v_{0i}^3} n_{0i}, \quad (17)$$

где $v_{03} = v_{02}$. Подставляя значения матричного элемента окончательно находим [2-6]:

$$\gamma = \frac{\omega_b^2 |q_x| v_{01}}{2\omega_q^2 (\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02})} (1 + R^3 + D^3), \quad (18)$$

где $\omega_b^2 = \frac{4\pi e^2 n_{0i}}{m}$; $R = \beta_{k_{01}}^2$ – коэффициент отражения частиц от барьера;

$D = \frac{v_{02}}{v_{01}} \alpha_{k_{01}}^2$ – коэффициент прохождения. Формула (5.33) получена в приближении $E_{ki} - U_0 \gg \hbar\omega_q$. Видно, что инкремент не зависит от знака U_0 .

Если положить $U_0 = 0$ то получим инкремент

$$\gamma = \frac{\omega_b^2 |q_x| v_{01}}{\omega_q^2 (\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02})}. \text{ Он в два раза меньше инкремента}$$

полученного в [8]. Это связано с тем, что при нахождении матричного элемента оператора энергии взаимодействия в отсутствие потенциального барьера изначально состояния электронов в средах «1» и «2» являются когерентными, то есть описываются одной волновой функцией. В выражении для инкремента матричные элементы в средах «1» и «2» складываются. При наличии потенциального барьера волновые функции в средах различны. В этом случае складываются квадраты парциальных матричных элементов, что и приводит к указанному уменьшению инкремента.

Если ширина уровня энергии электрона превосходит энергию плазмона $\frac{p^2}{2m} \gg T \gg \hbar\omega$, тогда количество электронов состояниях k ; $k^{(1)}$ связаны соотношением:

$$n_{k^{(1)}} = n_k + \frac{\omega}{v_0} \frac{dn_k}{dk_y}.$$

поверхностные плазмоны в этом случае затухают при взаимодействии с потоком заряженных частиц, поскольку фазовый объем, занимаемый частицами при поглощении плазмонов, превосходит таковой для излучающих частиц.

Выводы. Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа поверхностных плазмонов при их взаимодействии с потоком заряженных частиц, пересекающих границу раздела сред с неоднородным потенциалом.

Приведено решение кинетического уравнения, позволяющее определять влияние величины барьера на инкремент неустойчивости поверхностных колебаний; вклад в величину инкремента прошедшей и отраженной компонент потока частиц.

Исследованы механизмы взаимодействия потока заряженных частиц с собственными электромагнитными колебаниями двумерного электронного газа, возникновение которого обусловлено наличием потенциального барьера на границе раздела сред.

Определены механизмы влияния границы на взаимодействие поверхностных электромагнитных колебаний и электронов при наличии потенциального барьера. В качестве объектов исследований рассмотрены поверхностные плазмоны и собственные электромагнитные колебания двумерного электронного слоя.

Список литературы: 1. Белецкий Н.Н. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / Н.Н. Белецкий, В.М. Светличный, Д.Д. Халамейда, В.М. Яковенко. – Киев.: Наукова думка, 1991. – 216 с. 2. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. Стил М. Взаимодействие волн в плазме твердого тела / М. Стил, Б. Вюраль. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с. 6. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, В.И. Яковенко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 11. – С. 62–69. 7. Кравченко В.И. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 154–161. 8. Кравченко В.И. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 161–169. 9. Кравченко В.И. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83–89. 10. Кравченко

В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89–96. 11. Кравченко В.И. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103. 12. Кравченко В.И. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 103–111.

Bibliography (transliterated): 1. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jeletromagnitnyje javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. Kiev: Naukova dumka. 1991. 216 p. 5. 2. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Jeletromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz'. 1979. 225 p. 3. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p. 4. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jeletromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 p. 5. Zi C. Fizika poluprovodnikovyh priborov. Moscow: Mir. 1984. 456 p. 6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jeletromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jeletroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. pp. 62–69. 7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jeletromagnitnyh kolebanij v 2-D jeletronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 154–161. 8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jeletromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jeletromagnitnogo vozdejstvija. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 161–169. 9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjazhennyh chastic. Navedennogo vneshnim jeletromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jeletroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 83–89. 10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jeletromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 89–96. 11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatumhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh stuktur jeletroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 96–103. 12. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 103–111.

Поступила (received) 17.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-33

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of NIPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33.

Серков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Serkov Aleksandr Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-39, e-mail : bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Яценко Ирина Леонидовна – ассистент кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-39, e-mail: irina.kira@mail.ru

Yatsenko Irina Leonidovna – Assistant of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: irina.kira@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physico-Matematic Sciences, Professor, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 621.318

В. И. КРАВЧЕНКО, А. А. СЕРКОВ, В. С. БРЕСЛАВЕЦ, И. Л. ЯЦЕНКО, И. В. ЯКОВЕНКО

КИНЕТИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД

В работе, с помощью уравнения Шредингера было исследовано взаимодействие плазменных колебаний с моноэнергетическим потоком заряженных частиц, который проходил сквозь 2D электронный газ. Определен инкремент неустойчивости поверхностных плазмонов. Величина инкремента обратно пропорциональна времени пролета частиц сквозь 2D электронную систему. Получены аналитические решения задач взаимодействия токов, наведенных внешним электромагнитным излучением, с собственными электромагнитными колебаниями структур комплектирующих полупроводниковые приборы, в условиях режима неустойчивости (генерации) колебаний.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, кинетические неустойчивости, потенциальный барьер, поток заряженных частиц, генерация, черенковское и переходное излучение, поверхностные волны, проводящее твердое тело, энергия излучения

Введение. При рассмотрении взаимодействия электромагнитных колебаний и заряженных частиц в настоящей работе помимо вероятностного подхода (кинетических уравнений) использовалась также другая методика, позволяющая установить взаимосвязь между электромагнитными полями поверхностных колебаний и волновыми функциями электронов потока на границе [1]. Она обеспечивается с помощью уравнения Шредингера и дополнительных (по сравнению с электродинамическими) граничных условий для возмущенных волновых функций электронов пучка. При этом амплитуды и фазы возмущенных волновых функций электрона определяются уже существующими амплитудой и фазой плазмона, так что взаимодействие волн и частиц носит детерминированный характер. Условия для волновых функций позволяют определить влияние границы (в частности наличие потенциального барьера) на величину инкремента неустойчивости. В рамках данной модели исследовались механизмы возбуждения поверхностных плазмонов и определены выражения для инкрементов их неустойчивости.

При рассмотрении механизмов кинетических неустойчивостей электромагнитных колебаний, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц, пересекающих поверхность проводящего твердого тела, предполагалось, что высота потенциального барьера на границе раздела равна нулю или

бесконечности. Вместе с тем вопрос о влиянии его конечной величины на механизм обмена энергией волн и частиц на границе заслуживает особого внимания.

Авторами [2] определены вероятности процессов излучения и поглощения энергии электромагнитных колебаний электронами пучка на границе проводящего твердого тела с учетом потенциального барьера конечной величины, однако возможность развития неустойчивости не рассматривалась.

В работе учитывалось влияние потенциального барьера не только на поведение заряженных частиц потока, пересекающего границу, но и на спектральные характеристики электронов плазмоподобных структур. К ним, в частности, относятся структуры, в которых наличие потенциала приводит к возникновению двумерного (2D) электронного газа. Интерес к двумерным системам, связанный с их уникальными свойствами [3 – 4] (квантовый эффект Холла, особенности фазовых переходов), в последнее время усилился с появлением новых технологий создания наноструктур, перспективных для радиофизики твердого тела. В работе исследовалось взаимодействие собственных электромагнитных колебаний двумерного электронного слоя, создаваемого потенциальным барьером, с потоками заряженных частиц в условиях когда это взаимодействие носит детерминированный характер.

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-39, e-mail : bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Яценко Ирина Леонидовна – ассистент кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-39, e-mail: irina.kira@mail.ru

Yatsenko Irina Leonidovna – Assistant of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: irina.kira@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physico-Matematic Sciences, Professor, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 621.318

В. И. КРАВЧЕНКО, А. А. СЕРКОВ, В. С. БРЕСЛАВЕЦ, И. Л. ЯЦЕНКО, И. В. ЯКОВЕНКО

КИНЕТИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД

В работе, с помощью уравнения Шредингера было исследовано взаимодействие плазменных колебаний с моноэнергетическим потоком заряженных частиц, который проходил сквозь 2D электронный газ. Определен инкремент неустойчивости поверхностных плазмонов. Величина инкремента обратно пропорциональна времени пролета частиц сквозь 2D электронную систему. Получены аналитические решения задач взаимодействия токов, наведенных внешним электромагнитным излучением, с собственными электромагнитными колебаниями структур комплектующих полупроводниковые приборы, в условиях режима неустойчивости (генерации) колебаний.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, кинетические неустойчивости, потенциальный барьер, поток заряженных частиц, генерация, черенковское и переходное излучение, поверхностные волны, проводящее твердое тело, энергия излучения

Введение. При рассмотрении взаимодействия электромагнитных колебаний и заряженных частиц в настоящей работе помимо вероятностного подхода (кинетических уравнений) использовалась также другая методика, позволяющая установить взаимосвязь между электромагнитными полями поверхностных колебаний и волновыми функциями электронов потока на границе [1]. Она обеспечивается с помощью уравнения Шредингера и дополнительных (по сравнению с электродинамическими) граничных условий для возмущенных волновых функций электронов пучка. При этом амплитуды и фазы возмущенных волновых функций электрона определяются уже существующими амплитудой и фазой плазмона, так что взаимодействие волн и частиц носит детерминированный характер. Условия для волновых функций позволяют определить влияние границы (в частности наличие потенциального барьера) на величину инкремента неустойчивости. В рамках данной модели исследовались механизмы возбуждения поверхностных плазмонов и определены выражения для инкрементов их неустойчивости.

При рассмотрении механизмов кинетических неустойчивостей электромагнитных колебаний, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц, пересекающих поверхность проводящего твердого тела, предполагалось, что высота потенциального барьера на границе раздела равна нулю или

бесконечности. Вместе с тем вопрос о влиянии его конечной величины на механизм обмена энергией волн и частиц на границе заслуживает особого внимания.

Авторами [2] определены вероятности процессов излучения и поглощения энергии электромагнитных колебаний электронами пучка на границе проводящего твердого тела с учетом потенциального барьера конечной величины, однако возможность развития неустойчивости не рассматривалась.

В работе учитывалось влияние потенциального барьера не только на поведение заряженных частиц потока, пересекающего границу, но и на спектральные характеристики электронов плазмподобных структур. К ним, в частности, относятся структуры, в которых наличие потенциала приводит к возникновению двумерного (2D) электронного газа. Интерес к двумерным системам, связанный с их уникальными свойствами [3 – 4] (квантовый эффект Холла, особенности фазовых переходов), в последнее время усилился с появлением новых технологий создания наноструктур, перспективных для радиофизики твердого тела. В работе исследовалось взаимодействие собственных электромагнитных колебаний двумерного электронного слоя, создаваемого потенциальным барьером, с потоками заряженных частиц в условиях когда это взаимодействие носит детерминированный характер.

Основные результаты. Рассмотрим плазмодобный слой толщиной $2a$, окруженный средами с диэлектрическими постоянными ϵ_1 и ϵ_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 ϵ_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:

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

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 $U_0 \gg \frac{\hbar^2 \chi^2}{2m}$, $ka \ll 1$ 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 существования 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 δ – 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:

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

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

Систему уравнений (11) 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:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi^{(1)}}{\partial t} - H^{(0)}\Psi^{(1)} = H^{(1)}(\Psi_0^{(1)} + \Psi_0^{(3)}), \quad y < 0; \quad (12)$$

$$H^{(0)} = -\frac{\hbar^2 \Delta}{2m}; \quad H^{(1)} = \frac{ieh}{2mc}(\vec{\nabla} \vec{A}_1 + \vec{A}_1 \vec{\nabla});$$

$$\hbar \frac{\partial \Psi^{(2)}}{\partial t} - H^{(0)}\Psi^{(2)} = H^{(2)}\Psi_0^{(2)}, \quad y > 0;$$

$$H^{(2)} = \frac{ieh}{2mc}(\vec{\nabla} \vec{A}_2 + \vec{A}_2 \vec{\nabla}).$$

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

$$n = n^{(1)} + n^{(3)}; \quad n^{(p)} = \Psi_0^{(p)}\Psi^{(1)*} + \Psi_0^{(p)*}\Psi^{(1)};$$

$$p = 1, 3; \quad y < 0; \quad \vec{j} = \vec{j}^{(1)} + \vec{j}^{(3)};$$

$$\vec{j}^{(p)} = \frac{ieh}{2m} \left\{ \Psi^{(1)} \nabla \Psi_0^{(p)*} - \Psi^{(1)*} \nabla \Psi_0^{(p)} + \Psi_0^{(p)} \nabla \Psi^{(1)*} - \Psi_0^{(p)*} \nabla \Psi^{(1)} \right\} - \frac{e^2}{mc} |f_p|^2 A_1; \quad p = 1, 3.$$

$$n = n^{(2)}; \quad n^{(2)} = \Psi_0^{(2)}\Psi^{(2)*} + \Psi_0^{(2)*}\Psi^{(2)}; \quad y > 0; \quad j = \vec{j}^{(2)};$$

$$\vec{j}^{(2)} = \frac{ieh}{2m} \left\{ \Psi^{(2)} \nabla \Psi_0^{(2)*} - \Psi^{(2)*} \nabla \Psi_0^{(2)} + \Psi_0^{(2)} \nabla \Psi^{(2)*} - \Psi_0^{(2)*} \nabla \Psi^{(2)} \right\} - \frac{e^2}{mc} |f_p|^2 A_2 \quad (13)$$

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:

$$A_{1x}(0) = A_{2x}(0). \quad (14)$$

$$\varepsilon_{01} \frac{\partial^2 A_{1y}}{\partial t^2} + \varepsilon_{02} \frac{\partial^2 A_{2y}}{\partial t^2} + 4\pi(\vec{j}_y^{(1)} + \vec{j}_y^{(3)} - \vec{j}_y^{(2)}) = \frac{4\pi e^2 N_0 d}{m} \frac{\partial A_{1x}}{\partial x};$$

$$d = \frac{\hbar^2}{mV_0},$$

а также условия для возмущенных волновых функций электронов пучка:

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

$$\left. \frac{\partial \Psi^{(1)}}{\partial y} - \frac{\partial \Psi^{(2)}}{\partial y} \right|_{y=0} = 2\chi \Psi^{(1)}(0). \quad (15)$$

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:

$$A_{1x} = A e^{-qy} \cos \alpha; \quad A_{1y} = -A e^{-qy} \sin \alpha; \quad y > 0, \quad (16)$$

$$A_{2x} = A e^{qy} \cos \alpha; \quad A_{2y} = A e^{qy} \sin \alpha; \quad y < 0.$$

где

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

– частота плазмонов двумерного электронного газа,

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

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

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 (11) выражения для потенциала (15), найти их решения, удовлетворяющие граничному условию (14). Затем следует найти возмущенные концентрации электронов и токи в пучке, поля, создаваемые промодулированным пучком и удовлетворить граничным условиям (14).

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 (14) принимают вид:

$$\psi_{\pm}^{(1)} = -i \frac{\Omega}{2\omega_s} \psi_0^{(1)} F_1^{\pm} e^{\pm i\alpha}; \quad \psi_{\pm}^{(2)} = i \frac{\Omega}{2\omega_s} \psi_0^{(2)} F_2^{\pm} e^{\pm i\alpha};$$

$$F_1^{\pm} = \left(1 - \frac{k_0 + i\chi}{k_{\pm} - i\chi} \right) e^{-i(k_0 + k_{\pm})y} - e^{-qy} \left[1 - \frac{i\chi}{k_0 - i\chi} e^{-2ik_0 y} \right]; \quad (17)$$

$$F_2^{\pm} = \left(\frac{k_0 + i\chi}{k_{\pm} - i\chi} \right) e^{i(k_{\pm} - k_0)y} - \frac{k_0}{k_0 - i\chi} e^{-qy}.$$

Здесь

$$\hbar \Omega = \frac{ev_0 A}{c}; \quad v_0 = \frac{\hbar k_0}{m}; \quad k_{\pm} = \sqrt{k_0^2 \pm \frac{2m\omega_s}{\hbar}}. \quad (18)$$

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

$$\begin{aligned} n^{(1)} &= \Psi_0^{(1)*} (\Psi_+^{(1)} + \Psi_-^{(1)}) + \text{к.с.} = \\ &= -i \frac{\Omega n_0}{2\omega_s} (F_1^+ e^{i\alpha} + F_1^- e^{-i\alpha}) + \text{к.с.}; \\ n^{(2)} &= \Psi_0^{(2)*} (\Psi_+^{(2)} + \Psi_-^{(2)}) + \text{к.с.} = \\ &= i \frac{\Omega k_0 n_0}{2\omega_s (k_0 + i\chi)} (F_2^+ e^{i\alpha} + F_2^- e^{-i\alpha}) + \text{к.с.}; \\ n^{(3)} &= \Psi_0^{(3)*} (\Psi_+^{(1)} + \Psi_-^{(1)}) + \text{к.с.} = \\ &= -\frac{\chi \Omega k_0 n_0}{2\omega_s (k_0 + i\chi)} e^{2ik_0 y} (F_1^+ e^{i\alpha} + F_1^- e^{-i\alpha}) + \text{к.с.} \end{aligned} \quad (19)$$

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:

$$\begin{aligned} n^{(2)} &= 2 \frac{\Omega k_0 n_0}{(k_0^2 + \chi^2)^2 v_0} \left[(k_0^2 + \chi^2) \sin \left(\alpha + \frac{\omega_s}{v_0} y \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\omega_s}{v_0} \frac{k_0^2 - \chi^2}{k_0^2 + \chi^2} \cos \left(\alpha + \frac{\omega_s}{v_0} y \right) \right]; \\ n^{(3)} &= 4 \frac{\chi^2 \Omega k_0 n_0}{(k_0^2 + \chi^2)^2 v_0} (k_0^2 + \chi^2) \sin \left(\alpha - \frac{\omega_s}{v_0} y \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Выражение для $n^{(1)}$ мы не приводим, так как оно не вносит вклад в инкремент. Используя формулу (14) 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 из формулы (15), полагая $v_1 = v_2$, получим выражение для инкремента:

$$\gamma = \frac{\omega_b^2 q v_0}{\Omega_s^2} \left(1 + \frac{U_0^2 a^2}{\hbar^2 v_0^2} \right)^{-1}. \quad (21)$$

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:

$$\gamma = \frac{\omega_b^2 v_0}{\omega_b^2 d} \left(1 + \frac{U_0^2 a^2}{\hbar^2 v_0^2} \right)^{-1}. \quad (22)$$

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

Выводы. Исследованы механизмы взаимодействия потока заряженных частиц с собственными элек-

тромагнитными колебаниями двумерного электронного газа, возникновение которого обусловлено наличием потенциального барьера на границе раздела сред. Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа электромагнитных колебаний такой системы, приведено выражение для инкремента их неустойчивости.

Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа поверхностных плазмонов при их взаимодействии с потоком заряженных частиц, пересекающих границу раздела сред с неоднородным потенциалом. Приведено его решение, позволяющее определять влияние величины барьера на инкремент неустойчивости поверхностных колебаний; вклад в величину инкремента прошедшей и отраженной компонент потока частиц.

Определены механизмы влияния границы на взаимодействие поверхностных электромагнитных колебаний и электронов при наличии потенциального барьера. В качестве объектов исследований рассмотрены поверхностные плазмоны и собственные электромагнитные колебания двумерного электронного слоя.

Проведен сравнительный анализ неустойчивостей данных типов колебаний в условиях, когда взаимодействие волн и частиц носит случайный и детерминированный характер. Показано, что различия в выражениях для инкрементов связаны с изменением размеров области взаимодействия волн и частиц. Установлены различия влияния потенциального барьера на величину инкремента в случаях, когда процесс взаимодействия поверхностных плазмонов и заряженных частиц детерминирован или носит характер случайных столкновений.

Список литературы: 1. Белецкий Н.Н. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / Н.Н. Белецкий, В.М. Светличный, Д.Д. Халамейда, В.М. Яковенко. – Киев.: Наукова думка, 1991.– 216 с. 2. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. Стил М. Взаимодействие волн в плазме твердого тела / М. Стил, Б. Вюраль. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с. 6. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплекующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, В.И. Яковенко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 11. – С. 62–69. 7. Кравченко В.И. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 154–161. 8. Кравченко В.И. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 161–169. 9. Кравченко В.И. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплекующих электрорадио-

изделий / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83–89. **10.** Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89–96. **11.** Кравченко В.И. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103. **12.** Кравченко В.И. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С.103–111.

Bibliography (transliterated): **1.** Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. Kiev: Naukova dumka. 1991. 216 p. **5.** Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Jelektromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz'. 1979. 225 p. **3.** Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p. **4.** Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 p. **5.** Zi C. Fizika poluprovodnikovyh priborov. Moscow: Mir. 1984. 456 p. **6.** Kravchenko V.I., Jakovenko V.I.,

Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhij jelektorradioidzelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. pp. 62–69. **7.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jelektromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 154–161. **8.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnogo jelektromagnitnogo vozdejstvija. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 161–169. **9.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vneshnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhij jelektorradioidzelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 83–89. **10.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 89–96. **11.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh stuktur jelektorradioidzelij v uslovijah vozdejstvija storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 96–103. **12.** Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 103–111.

Поступила (received) 24.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-33

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of NIPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33.

Серков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Serkov Aleksandr Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-39, e-mail : bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: bres123@mail.ru

Яценко Ирина Леонидовна – ассистент кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-39, e-mail: irina.kira@mail.ru

Yatsenko Irina Leonidovna – Assistant of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-39, e-mail: irina.kira@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physico-Matematic Sciences, Professor, Professor of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 621.317.3

Ю. С. НЕМЧЕНКО, В. В. КНЯЗЕВ, И. П. ЛЕСНОЙ, С. Б. СОМХИЕВ

УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К МАГНИТНЫМ ПОЛЯМ ЧАСТОТЫ СЕТИ У-МПЧС

Описана конструкция и результаты аттестации установки, предназначенной для испытаний настольных малогабаритных и напольных крупногабаритных электротехнических и электронных изделий, оборудования и аппаратуры (далее в тексте – технические средства – (ТС), которые в процессе эксплуатации могут подвергаться воздействию магнитных полей частоты сети (МПЧС) (длительному или кратковременному). Испытания проводятся по пяти испытательным уровням в длительном режиме и по двум испытательным уровням в кратковременном режиме в соответствии с ДСТУ ІЕС 61000-4-8:2012.

Ключевые слова: испытание, магнитные поля частоты сети, технические средства, установка, генератор, аттестация.

Введение. Электрические сети различного назначения создают в жилых и промышленных помещениях длительные магнитные поля частоты сети (МПЧС). В соответствии со строительными нормами эти МПЧС сравнительно невелики, однако, ситуация обостряется в помещениях электрических подстанций. Там напряженность МПЧС возрастает в десятки раз, т.к. на территориях подстанций начинаются выходы на линии электропередач высокого напряжения и где рабочие токи значительно превышают токи в жилых и промышленных помещениях. Ситуация резко ухудшается при возникновении аварийных режимов в электросетях, например, при коротких замыканиях на ЛЭП. В этом случае напряженность МПЧС может кратковременно (на несколько секунд) возрастать в десятки и сотни раз до тех пор, пока не сработает система релейной защиты. Размещаемые в этих помещениях современные, насыщенные радиоэлектроникой, технические средства (ТС) взаимодействуют с МПЧС и при недостаточной степени защиты эти ТС могут ненадежно функционировать.

Описание установки У-МПЧС.

Для включения этого вида испытаний в сферу аккредитации Испытательной лаборатории НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» разработана и создана испытательная установка У-МПЧС, рис. 1.

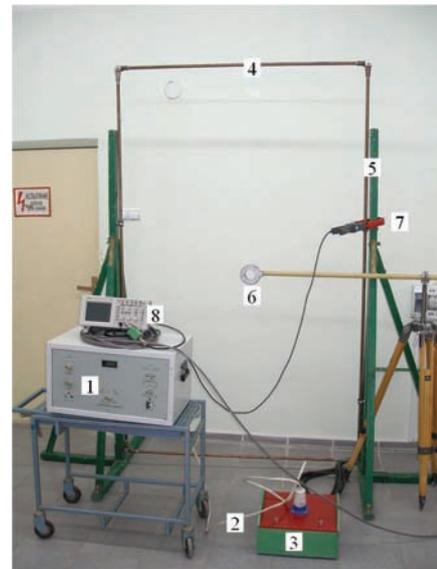


Рисунок 1 – Общий вид установки У-МПЧС:

- 1 – генератор Г-МПЧС-М;
- 2 – соединительная линия;
- 3 – согласующий выходной трансформатор;
- 4 – полеобразующая система ПС-4;
- 5 – изоляционная стойка ИС;
- 6 – измеритель напряженности магнитного поля ИНМП-3-1000;
- 7 – измерительные клещи Fluke I3000;
- 8 – осциллограф Tektronix- DPO 4104

Таблица 1 – Нормы на МПЧС

Контролируемый параметр	Размерность	Испытательный уровень	Номинальное значение	
			Длительный режим	Кратковременный режим
Напряженность магнитного поля	А/м	1	1	–
		2	3	–
		3	10	–
		4	30	300
		5	100	1000
Длительность выходного тока		1	1-10 мин	–
		2		
		3		
		4		
		5		1-3 с

Международная электрическая комиссия, комплектуя пакет внешних испытаний на электромагнитную совместимость (ЭМС), учла фактор МПЧС и включила испытания на стойкость к ним в качестве одного из основных и обязательных видов испытаний на ЭМС. С этой целью было разработано несколько версий соответствующего стандарта ІЕС 61000-4-8, которые с 1995 года действуют и в Украине [1]. Нормы на МПЧС по этим стандартам приведены в табл. 1.

Структурно установка состоит из полеобразующей системы (ПС), на которую замыкается генератор тока промышленной частоты (Г-МПЧС-М) через согласующий выходной трансформатор (СВТ).

Проектирование У-МПЧС начинается с выбора конструкции ПС, так как в соответствии со стандартом ДСТУ 2465-94 [2] удаление проводников ПС от наружных поверхностей ТС должно быть не менее 20 % от длины каждой стороны ПС.

В нашей практике поступали на испытания ТС с объемом от нескольких кубических дециметров до нескольких кубических метров, поэтому было приня-

то решение включить в состав МПЧС несколько типоразмеров ПС, дискретно для каждого типоразмера ТС (всего 4 типоразмера ПС).

Основные параметры установки У-МПЧС приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Основные параметры установки У-МПЧС

Параметр	Размерность	Величина
1. Напряжение сети питания	В Гц	220 50
2. Напряженность магнитного поля в рабочем объеме полеобразующих систем: для ПС-1 для ПС-2 для ПС-3 для ПС-4	А/м А/м А/м А/м	от 1 до 1000 от 1 до 1000 от 1 до 1000 от 1 до 1000
3. Время работы установки в кратковременном режиме	с	от 1 до 3
4. Коэффициент преобразования штатного измерителя напряженности магнитного поля ИНМП-3-1000	мВ/А/м	0,159
5. Мощность, потребляемая от сети, не более	Вт	4000

Описание генератора Г-МПЧС-М

Генератор Г-МПЧС-М предназначен для закаливания в ПС требуемой для каждого типоразмера ПС величины рабочего тока частотой 50 Гц с необходимой длительностью по табл. 1. Поэтому Г-МПЧС-М представляет собой комплект трансформаторов с большим количеством отводов, включаемых при работе при помощи соответствующего таймера.

Элементы Г-МПЧС-М сконструированы таким образом, что независимо от типоразмера ТС напряженность магнитного поля в центре каждой ПС будет автоматически устанавливаться одинаковой в соответствии с нормами по табл. 1.

Структурная схема генератора Г-МПЧС-М приведена на рис. 2.

Работает генератор следующим образом. На его вход подается переменное напряжение 220 В от ЛАТР. Это напряжение через блок таймера-коммутатора (БТК) поступает на блок регулируемых напряжений (БРН). С этого блока напряжение требуемой величины поступает на блок формирования токов (БФТ), который и выдает необходимые токи на ПС.

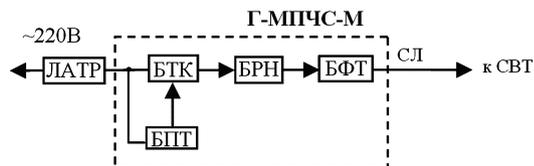


Рисунок 2 – Структурная схема установки У-МПЧС Г-МПЧС-М – испытательный генератор;
БТК – блок таймера-коммутатора;
БРН – блок регулируемых напряжений;
БФТ – блок формирования тока;
БПТ – блок питания таймера;
СЛ – соединительная линия, $l = 3$ м;
СВТ – согласующий выходной трансформатор;
ЛАТР – автотрансформатор

Генератор Г-МПЧС-М, общий вид которого показан на рис. 3, собран в металлическом корпусе с габаритами 400x600x235 мм.



Рисунок 3 – Общий вид генератора Г-МПЧС-М

Передняя панель Г-МПЧС-М и расположение элементов управления и индикации на ней показаны на рисунке 3. Здесь находятся:

- клавиша включения питания СЕТЬ–ВКЛ и индикаторная лампочка, показывающая подачу на генератор напряжения из сети электропитания;
- регулятор напряжения МЕНЬШЕ–0–БОЛЬШЕ, предназначенный для регулировки величины входного сетевого напряжения, подаваемого в схему генератора с трансформатора Т1 (см. схему на рисунке 8);
- табло «240 В» индикатора подаваемого в схему напряжения;
- переключатель ТИП ПС, предназначен для выбора подключаемой к выходу генератора полеобразующей системы (цифры показывают размеры ПС в метрах): 1x1 (ПС-1), 1,4x1,4 (ПС-2), 2,3x1,8 (ПС-3), 2,8x1,4 (ПС-4);
- переключателем НАПРЯЖ.МАГН.ПОЛЯ, А/м дискретно регулируется величина напряженности испытательного магнитного поля в ПС: от 1 А/м до 100 А/м – для режима длительного воздействия и от 300 А/м до 1000 А/м – для режима кратковременного воздействия;
- два переключателя ТАЙМЕР: один переключатель – МИНУТЫ, предназначен для дискретной установки времени работы генератора в длительном режиме от 1 до 10 мин; второй переключатель – СЕКУНДЫ, предназначен для дискретной установки времени работы генератора в кратковременном режиме от 1 до 3 с;
- кнопка ПУСК предназначена для запуска генератора, при этом загорается индикаторная лампочка над ней;
- кнопка СТОП предназначена для остановки генератора в любой момент.

На задней панели генератора размещены два разъема: СЕТЬ 220 В – для подключения к сети питания и ВЫХОД – для подключения к силовому блоку, с помощью соединительных кабелей, а также клемма «⏚», предназначенная для соединения генератора с контуром заземления.

Устройство БТК

Блок таймера-коммутатора (БТК) предназначен

для включения и выключения генератора Г-МПЧС в течение заданных фиксированных интервалов времени.

Параметры БТК:

- длительный коммутируемый ток – до 8 А;
- кратковременный коммутируемый ток – до 50 А;
- длительные интервалы коммутации – от 1 мин. до 10 мин. через 1 мин.;
- кратковременные интервалы коммутации – от 1 с до 3 с через 0,5 с.

Конструктивно БТК размещен на двух платах (плата блока таймера и плата блока коммутатора). Органами управления БТК, вынесенными на переднюю панель генератора, помимо упомянутых выше (ТАЙМЕР–МИНУТЫ–СЕКУНДЫ), являются кнопка ПУСК и кнопка СТОП. Индикатором включения и работы БТК является светодиод HL2 на передней панели генератора.

Все элементы и узлы БТК размещены в металлическом корпусе-экране.

Устройство БРН

Блок регулируемых напряжений (БРН) состоит из трансформатора Т1. Трансформатор напряжения Т1 имеет 9 отводов для регулировки входного напряжения в небольших пределах относительно номинального напряжения сети. Его ось выведена на переднюю панель: МЕНЬШЕ–0–БОЛЬШЕ. Вторичная обмотка Т1 разбита на 13 частей (по два витка в каждой). Выводы от групп обмоток подсоединены к переключателю SA2 типа 8П4Н2 НАПРЯЖ.МАГН.ПОЛЯ, А/м, имеющему четыре семипозиционных пакета. Каждый пакет формирует испытательный ток для той или иной полеобразующей системы.

Устройство СВТ

Согласующий выходной трансформатор (СВТ), рис. 4, предназначен для создания дискретных токов, которые при протекании через полеобразующие системы обеспечивают заданные дискретные напряженности магнитного поля в полеобразующих системах. СВТ подключается к БРН и состоит из семипозиционного мощного переключателя типа 8П4Н2 – НАПРЯЖ.МАГН.ПОЛЯ, А/м и набора гасящих переменных резисторов (всего по 4 резистора для каждого вида ПС). Подключение СВТ к конкретному виду ПС осуществляется болтами М20. Подключение СВТ к Г-МПЧС-М происходит соединительным кабелем длиной 3 м через розетку разъема типа РА-32.



Рисунок 4 – Согласующий выходной трансформатор

Устройство ПС

В соответствии с [1] в качестве ПС могут использоваться как одновитковые, так и многовитковые катушки прямоугольной формы. Преимущество многовитковых ПС в том, что для них требуются небольшие рабочие токи, однако сделать эти ПС разъемными (что требуется для испытания ТС больших габаритов, особенно напольных ТС) сложно. Поэтому в нашей лаборатории сделаны ПС одновитковыми и разъемными, что, с одной стороны, резко упрощает размещение ТС внутри ПС, а, с другой стороны, требует рабочих токов величиной от 1 кА до 2,5 кА. Именно с этой целью и применяется трансформатор тока СВТ.

ПС – это набор из четырех индукционных катушек ПС-1, ПС-2, ПС-3 и ПС-4, предназначенных для создания в их объеме магнитного поля с напряженностями в геометрическом центре от 1 А/м до 1000 А/м. Все четыре варианта ПС имеют в плане прямоугольную форму и следующие геометрические параметры:

- ПС-1 1 м x 1 м;
- ПС-2 1,4 м x 1,4 м;
- ПС-3 2,3 м x 1,0 м;
- ПС-4 2,8 м x 1,4 м.

ПС-1, ПС-2 и ПС-3 выполнены из медной трубки с внешним диаметром 18 мм и внутренним диаметром 10 мм; ПС-4 выполнен из медного прутка диаметром 22 мм. Каждая ПС имеет один виток, выполненный разъемным в виде секций для удобства при испытаниях крупногабаритных ТС. Для подсоединения к Г-МПЧС-М на ПС имеются выводы, на концах которых установлены мощные клеммы.

Для установки ПС на испытательной площадке служат изоляционные стойки ИС (2 шт.), позволяющие ориентировать ПС в трех взаимно перпендикулярных направлениях и обеспечивать достаточную жесткость и устойчивость конструкции в целом.

Устройство СЛ

Соединительная линия (СЛ) представляет собой скрученный провод, длиной $l = 3$ м, требуемой из условия предотвращения влияния магнитного поля Г-МПЧС-М на ПС и обратного влияния поля, создаваемого в катушке, на Г-МПЧС-М.

Устройство СИВП

Для контроля выходных параметров установки У-МПЧС (формы, величины и длительности напряженности магнитного поля в ПС) в состав установки входит штатная система измерения выходных параметров (СИВП).

СИВП состоит из измерителя напряженности магнитного поля ИНМП-3-1000 [3] и токоизмерительных клещей Fluke i3000s [4], которые подключаются к осциллографу Tektronix DPO 4104 [5].

Измеритель напряженности магнитного поля ИНМП-3-1000 – это нестандартизованное средство измерения, разработанное нами для измерений напряженности магнитного поля частоты сети, описан в руководстве по эксплуатации ИНМП-3.000.000.000 РЭ, сначала аттестованное в ГП «Харьковстандартметрология», а потом откалибровано в ННЦ «Инсти-

тут метрології». Общий вид измерителя напряженности магнитного поля ИНМП-3-1000 приведен на рис. 5.

Подключение ИНМП-3-1000 к осциллографу осуществляется при помощи кабельной линии передачи информации (КЛПИ) длиной $l=10$ м и интегратора (И). Для подключения к ИНМП-3-1000 на входном конце КЛПИ имеется разъем СР-75-54ФВ, со стороны осциллографа – разъем СР-50-74П.



Рисунок 5 – Общий вид измерителя напряженности магнитного поля ИНМП-3-1000

Токоизмерительные клещи Fluke i3000s – стандартный измерительный прибор, предназначенный для бесконтактного измерения тока в различного рода проводниках и имеющий амплитудный диапазон от 1 А до 3000 А частотой до 100 кГц.

Результаты аттестации генератора. Типовые осциллограммы напряжения с выхода измерителя напряженности магнитного поля ИНМП-3-1000 в длительном режиме (а) и кратковременном режиме работы (б) установки У-МПЧС приведены на рис. 6.

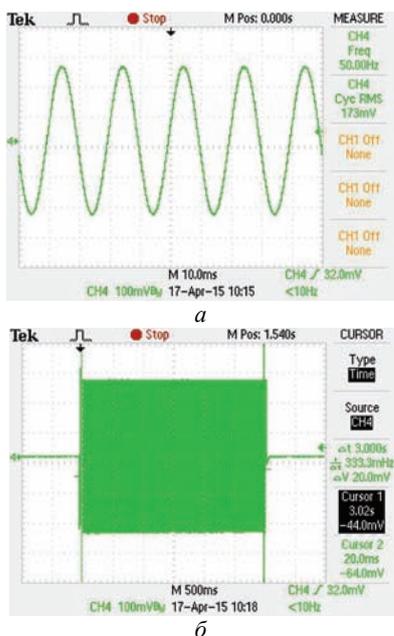


Рисунок 6 – Типовые осциллограммы напряжения с выхода измерителя напряженности магнитного поля ИНМП-3-1000 в длительном режиме (а) и кратковременном режиме работы установки У-МПЧС

Методика проведения испытаний

Методика проведения испытаний состоит из трех циклов:

Первый цикл – подготовка рабочего места.

Второй цикл – подготовка испытательного и измерительного оборудования.

Третий цикл – проведение испытаний.

Первый цикл состоит из 3 этапов:

1 этап – на основании Программы испытаний устанавливается вид рабочего места для проведения испытаний, которое зависит от вида ТС (напольного или настольного расположения – рис. 7 и 8);

2 этап – выбор ПС в зависимости от габаритов ТС по нормам, приведенным выше;

3 этап – установление норм испытаний, исходя из Программы испытаний.

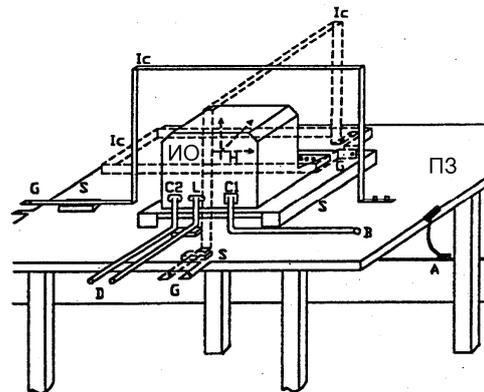


Рисунок 7 – Расположение испытательного оборудования при испытании настольных малогабаритных изделий ИО – испытываемое оборудование; ПЗ – плоскость заземления

Второй цикл – собрать рабочее место по рис. 7 или 8. Установить ПС на изоляционную стойку, а в центре ПС разместить штатный измеритель напряженности магнитного поля ИНМП-3-1000 на штатной изоляционной планке таким образом, чтобы плоскости ПС и измерительного преобразователя измерителя ИНМП-3-1000 совпадали, а кабель от него подстыковать к каналу I осциллографа.

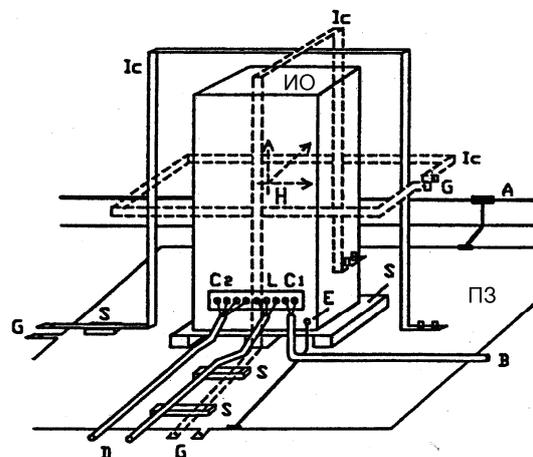


Рисунок 8 – Расположение испытательного оборудования при испытании напольных крупногабаритных изделий ИО – испытываемое оборудование; ПЗ – плоскость заземления

Охватить ПС в любом месте измерительными клещами и измерительный кабель от них подстыковать к каналу II осциллографа. На генераторе Г-МПЧС-М установить испытательный уровень. Включить генератор и нажать кнопку ПУСК. При этом на осциллографе (при правильно установленных чувствительностях каналов) должны появиться две осциллограммы: по каналу I – напряженность магнитного поля, а по каналу II – осциллограмма тока в ПС.

Рассчитать напряженность магнитного поля H_0 (в амперах на метр – А/м) в центре ПС по формуле:

$$H_0 = \frac{U_{\text{ЭО}}^I}{K_n^{\text{ИНМП}}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ЭО}}^I$ – напряжение на канале I осциллографа, В; $K_n^{\text{ИНМП}}$ – коэффициент преобразования измерителя ИНМП, В/А/м, берется из свидетельства о калибровке на него.

Рассчитать величину тока в ПС $I_{\text{ПС}}$ (в амперах) по формуле

$$I_{\text{ПС}} = \frac{U_{\text{ЭО}}^{\text{II}}}{K_n^{\text{ТК}}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{ЭО}}^{\text{II}}$ – напряжение на канале II осциллографа, В; $K_n^{\text{ТК}}$ – коэффициент преобразования токоизмерительных клещей, В/А, берется из свидетельства об их калибровке.

При помощи регулятора МЕНЬШЕ–0–БОЛЬШЕ установить требуемое по программе испытаний значение напряженности магнитного поля. Если при помощи этого регулятора не удастся установить требуемую напряженность магнитного поля, то использовать для этой цели ЛАТР. Выключить генератор.

Вынести из рабочего объема ПС измеритель ИНМП-3-1000 вместе с изоляционной планкой, одновременно отстыковав его кабель от ЭО.

Третий цикл – установить испытываемое изделие в рабочий объем ПС. Включить генератор снова. Проверить работоспособность ТС во всех режимах его работы, предусмотренных нормативной документаци-

ей на него.

Нажать кнопку ПУСК на генераторе, тем самым нагружая испытываемое изделие заданным магнитным полем, и при этом одновременно контролируя величину выходного тока установки. Повторить испытания в трех взаимно перпендикулярных плоскостях.

В процессе проведения испытаний проверять работоспособность ТС штатным проверочным комплексом (если он предусмотрен), или это сделать после окончания испытаний.

Выводы: Генератор У-МПЧС успешно прошел первичную аттестацию с участием представителей ГП «Харьковстандартметрология» по разработанной в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» соответствующей Программе и методике аттестации. Установка У-МПЧС введена в эксплуатацию в ИЛ НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» при проведении испытаний ТС на устойчивость к МПЧС.

Список литературы: 1. ДСТУ ІЕС 61000-4-8:2012 Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги і методи випробувань. 2. ДСТУ 2465-94 Стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги і методи випробувань. 3. Вимірювач напруженості магнітного поля ИНМП-3-1000. Настанова з експлуатації. 4. Струмовимірювальні кліщі Fluke і3000s. Настанова з експлуатації. 5. Цифровий чотирьохканальний запам'ятовуючий осцилограф Tektronix DPO 4104. Настанова з експлуатації.

Bibliography (transliterated): 1. DSTU IES 61000-4-8:2012 Sumisnist' tehnicnih zasobiv elektromagnitna. Stijkist' do magnitnih poliv chastoti merezhi. Tehnicni vimogi i metodi viprobuvan'. 2. DSTU 2465-94 Stijkist' do magnitnih poliv chastoti merezhi. Tehnicni vimogi i metodi viprobuvan'. 3. Vimirjuvach napruzenosti magnitnogo polja INMP-3-1000. Nastanova z ekspluatatsii. 4. Strumovimirjuval'ni klishhi Fluke i3000s. Nastanova z ekspluatatsii. 5. Cifrovij chotir'ohkanal'nij zapam'jatovujuchij oscilograf Tektronih DPO 4104. Nastanova z ekspluatatsii.

Поступила (received) 22.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Немченко Юрій Семенович – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» НТУ «ХПИ», главный метролог, тел.: (057) 707-68-68.

Netchenko Jurij Semenovich – Research and Design Institute "Molniya" NTU "KhPI", Main metrologist, tel.: (057) 707-68-68.

Князев Владимир Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния" НТУ «ХПИ», ведущий научный сотрудник, тел.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua.

Knyaziev Volodymyr Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior staff scientist, Research and Design Institute "Molniya" NTU "KhPI", principal scientist, tel.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua.

Лесной Иван Петрович – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния" НТУ «ХПИ», заведующий лабораторией, тел.: (057) 707-68-68.

Lesnoj Ivan Petrovich – Research and Design Institute "Molniya" NTU "KhPI", manager by a laboratory, tel.: (057) 707-68-68.

Сомхив Сергей Борисович – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния" НТУ «ХПИ», ведущий инженер, тел.: (057) 707-68-68.

Somhiev Sergej Borisovich – Research and Design Institute "Molniya" NTU "KhPI", leading engineer, tel.: (057) 707-68-68.

УДК 621.74.046 : 004

В. А. ОЛЕЙНИК, О. Н. СИЗОНЕНКО, Г. Ф. МЯЛЬНИЦА**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ПРИНТЕРА PROJET460 PLUS В СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ТОЧНОГО ЛИТЬЯ**

Рассмотрена возможность повышения технологичности процесса точного литья в серийном производстве предприятия за счет полномасштабного внедрения технологии быстрого прототипирования, на базе 3D-принтера ProJet460 Plus. Переход на изготовление керамических стержней охлаждаемых лопаток ГТД методом 3D-печати позволяет снизить количество технологических операций и сократить время, необходимое для устранения недочетов в случае их выявления при испытаниях.

Ключевые слова: 3D-принтер, 3D-печать, аддитивные технологии, трехмерная печать, стержни охлаждаемых лопаток.

Введение. В наше время в условиях жесткой международной рыночной экономики актуальными для предприятия являются сроки изготовления и стоимость газотурбинных двигателей (ГТД), как морского применения, так и газоперекачивающих станций. Возможность снизить срок изготовления и себестоимость двигателей позволит качественно выделиться на мировом рынке. Одним из механизмов достижения данных целей, несомненно, является переоснащение и модернизация оборудования на предприятии.

В настоящее время одним из перспективных направлений в области производства машиностроительной продукции являются технологии «трехмерной печати» с применением 3D-принтеров, позволяющие получить готовое изделие на основе разработанных ранее трехмерных компьютерных моделей, что позволяет полностью или частично исключить трудоемкий и длительный процесс изготовления различной оснастки [1]. Тогда становится реальной ситуация, когда для получения конечного изделия достаточно ее 3D-модели.

Развитие аддитивных технологий привело к широкому ассортименту как самих 3D-принтеров, так и методов печати. В данное время на предприятии ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект» работает 3D-принтер ProJet 460 Plus (далее 3D-принтер), который используется для изготовления моделей, деталей и узлов, с целью их визуализации после 3D-проектирования. Наглядность позволяет конструкторам и технологам определить технологичность изделия до внедрения в производство.

Описание процесса. Данный 3D-принтер работает по технологии струйной трехмерной печати. ProJet 460 Plus является профессиональным 3D-принтером, использующим струйную послойную технологию печати (CJP) и порошок на основе гипса (около 40 %) в качестве материала для построения. Он идеально подходит для быстрого изготовления полноцветных прототипов [2].

Применение специального порошкообразного вещества для создания трехмерных моделей позволяет достичь высокой детализации всех, даже имеющих сложную геометрию, элементов. 3D-принтер ProJet460 Plus имеет самую большую рабочую камеру среди прочих принтеров этой серии. Также необходимо отметить высококачественную передачу цвета и высокое разрешение. Это позволяет создавать качественные

полноцветные модели за считанные часы, либо множество небольших моделей одновременно, что практически невозможно в случае, где для создания моделей необходимо наличие поддержек.

Указанная технология была разработана в Массачусетском технологическом институте (MIT) в 1993 году. Технология получила коммерческое распространение в 1995 году с помощью компании Z Corporation, приобретенной корпорацией 3D Systems в 2012 году [3].

Суть метода заключается в том, что контуры модели вычерчиваются печатной головкой, наносящей связующее вещество на порошковый материал [4-8]. Таким образом, частицы каждого нового слоя после просыпки и утрамбовки склеиваются между собой и с предыдущими слоями специальным связующим веществом до образования готовой трехмерной модели. Затем происходит сушка модели в 3D-принтере и очистка от остатков порошка.

Постановка задачи. При внедрении 3D-принтера ProJet 460 Plus на предприятии рассматривались направления для внедрения данного оборудования в производственный технологический цикл. Были намечены следующие этапы дальнейших исследований:

- изготовление стержней охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей (ГТД);
- изготовление пресс-форм;
- изготовление мастер-моделей;
- изготовление различных литниковых элементов.

Основным и самым перспективным направлением применения данного 3D-принтера является изготовление керамических стержней для охлаждаемых лопаток ГТД. Материалы, поставляемые с принтером не подходят для данных целей, в связи с тем, что при повышенных температурах (выше 150 °С) происходит выгорание связующего материала и изменение геометрической формы. Поэтому прорабатывается вопрос ухода от материалов, поставляемых фирмой 3D Systems и переход на материалы, используемые на предприятии.

ProJet 460 Plus работает с материалами VisiJet PXL Core – высококачественный композиционный материал на основе гипса и VisiJet PXL Binder – жидкое связующее вещество, используемое для окрашивания и склеивания слоев модельного материала. Для ухода от этих материалов рассматривались следующие аналоги. Аналогом замены гипса рассматрива-

лись порошковые материалы, в основе которых электро-корунды марок F280, F320, F800 (фирмы Enpmex), маршалит и кварц. В качестве связующего материала к ним рассматривались вещества типа Ludox-SK, гидролизный этилсиликат ЭТС-40, и связующее КП-1 по ТУ 6.02-5-38.

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования по применению вышеупомянутых материалов для 3D-принтера ProJet 460 Plus [9-11]. Экспериментальные образцы проходили исследования по методике предприятия для керамических стержней. Полученные образцы проходили испытания на прочность, коробление, температурную стойкость при заливке металлом и выщелачивание, согласно технологического процесса предприятия.

Результаты и обсуждение. По результатам экспериментов был сделан вывод о возможности применения материалов используемых на предприятии для печати керамических стержней охлаждаемых лопаток. Это позволяет значительно сократить сроки изготовления стержней и частично уйти от изготовления дорогостоящей оснастки. Увеличение количества принтеров данной модели в дальнейшем позволит полностью обеспечить предприятие необходимым количеством стержней.



Рисунок 1 – Готовая пресс-форма, распечатанная на 3D-принтере

Также рассматривался вариант применения 3D-принтера ProJet 460 Plus для изготовления элементов пресс-форм в литейном производстве. Была напечатана пресс-форма для модели поворотного штуцера (см. рис. 1). После печати пресс-форма, для придания ей остаточной прочности, была пропитана составом на основе эпоксидной смолы. Затем прошла стадию доводки для придания конечной шероховатости. После этого на модельном участке модельным составом КС-5А были запрессованы штуцера (см. рис. 2). Качество изготовления (шероховатость, точность) удовлетворительное. На распечатанных вставках были проведены исследования механических свойств материала. Определены возможность механической постобработки

(фрезерование, шлифование, полировка, сверление, нарезка резьбы), и сделан вывод о возможности доработки пресс-форм.



Рисунок 2 – Готовые вставки с полученными моделями штуцеров из модельной массы, запрессованными по серийной технологии

Подтверждена возможность использования распечатанных вставок для запрессовки моделей из различных модельных составов. Что, в свою очередь, позволяет сделать вывод о возможности применения технологии 3D-печати для изготовления пресс-форм. И хотя ресурс пресс-формы, выполненной из гипса, значительно меньше, чем из металла, данная технология актуальна на стадии внедрения новых изделий. На данный момент от стадии изготовления чертежей и до получения пресс-формы из металла может пройти 6-8 месяцев. На 3D-принтере данный процесс может занять несколько недель.

Также прорабатывался вопрос о применении 3D-принтера ProJet 460 Plus для изготовления мастер-моделей, по которым в дальнейшем изготавливались отливки. Были напечатаны неохлаждаемые лопатки двигателя 3 ступени. После изготовления мастер-моделей (неохлаждаемой лопатки ГТД) и их упрочнения английской солью (epsom salt) или эпоксидной смолой, они передавались в серийное производство для изготовления оболочковых керамических форм и для последующего литья. В цехе осуществлялось изготовление форм по отработанной на предприятии технологии, за исключением воскования (окувание в расплавленный воск) моделей для обеспечения требуемой шероховатости поверхности.

Полученные на основании моделей огнеупорные керамические блоки проходили дальнейшую обработку согласно отработанной на предприятии техпроцесса, после чего осуществлялась заливка жаропрочного сплава в вакуумных печах. Полученные опытные детали проходили обработку по технологии предприятия. После проведенных работ принято решение о возможности применения данной технологии в том случае, когда есть необходимость быстро изготовить небольшую партию изделий. В частности, когда для ремонтного двигателя не нужна партия лопаток, а есть

необходимость в небольшом количестве лопаток.

Также рассматривалась возможность изготовления отдельных элементов для создания блоков при литье по выплавляемым моделям. На 3D-принтере были распечатаны геликоиды, которые применялись при создании блоков для изготовления монокристалльных лопаток методом направленной кристаллизации. После изготовления оболочковых форм и выплавления модельной массы в бойлерклаве при прокалке формы в печи по технологии цеха связующее вещество гипсовых элементов выгорало, а оставшейся порошок удалялся путем продувки формы сжатым воздухом. По данным работам был сделан вывод о возможности применения данной технологии в литейном производстве.

Данные работы целесообразно проводить, когда разработчиком выполнено проектирование 3D изделия и нет готовой оснастки, пресс-форм для изготовления деталей, которые должны проходить натурные испытания. Данная технология 3D-печати позволяет сократить время от разработки до испытаний готового изделия от 10 до 12 месяцев. И на базе проведенных испытаний сделать соответствующие выводы о применении данных деталей и о запуске их в серийное производство. В случае обнаружения недочетов в чертежах, ошибок или неудовлетворительных результатов испытаний, есть возможность в кратчайшие сроки устранить недостатки и изготовить новые опытные образцы для испытаний, с минимальными затратами не привлекая к данной работе основные цеха предприятия.

Выводы. Применение 3D-принтера ProJet 460 Plus в литейном производстве для изготовления стержней охлаждаемых лопаток, элементов пресс-форм, литниковых элементов и моделей для отливок позволяет:

1. Уйти от изготовления дорогостоящей оснастки, что в свою очередь позволит сократить сроки от разработки до внедрения готового изделия с 10-12 месяцев до нескольких недель. То есть сократить сроки передачи новых ГТД в серийное производство.

2. Модернизация производства за счет комплексного внедрения 3D-принтеров позволит сократить технологические процессы изготовления изделий и удешевить продукцию, выпускаемую серийным производством.

3. Для расширения сферы деятельности и обеспечения конкурентоспособности предприятия на международных рынках сбыта следует расширить ассортимент 3D-принтеров и интегрировать разработанную технологию изготовления керамических стержней в технологический процесс предприятия.

Список литературы: 1. Довбыши В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В. М. Довбыши, П. В. Забеднов, М. А. Зеленко // Библиотека литейщика. – 2014. – № 8. – С. 40 – 52. 2. 3D Today [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology/ 3. Технология 3D печати Z Corporation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cybercom.ru>. 4. Довбыши В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В. М. Довбыши, П. В. Забеднов, М. А. Зеленко // Библиотека литейщика. – 2014. – № 9. – С. 31-45. 5. Довбыши В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В. М. Довбыши, П. В. Забеднов, М. А. Зеленко // Библиотека литейщика. – 2014. – № 11. – С. 57-69. 6. Зеленко М. А. Аддитивные технологии в опытном литейном производстве. Технологии литья металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм / М. А. Зеленко, П. В. Забеднов // Металлургия машиностроения. – 2013. – № 5. – С. 37-45. 7. Изготовление объектов с использованием ламинирования [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://3dpr.ru/izgotovlenie-obektov-s-ispolzovaniem-laminirovaniya>. 8. Технологии 3D-печати [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://q99.it/7zINk1p> 9. Иванова А. М. Физические особенности селективного лазерного спекания порошковых металл-полимерных композиций / А. М. Иванова, С. П. Котова, Н. Л. Курпьянов и др. // Квантовая электроника. – 1998. – № 5. – С. 433-438. 10. Антонов Е. Н. Разработка метода поверхностного селективного лазерного спекания для формирования матриц тканей инженерных конструкций / Е. Н. Антонов, В. Н. Багратшвили, В. К. Попов, А. В. Попова, С. А. Бочкова, Л. И. Кротова, Дж. Барри, Р. Орэффо, С. М. Хоудл // 30 лет ИПЛИТ РАН. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.laser.ru/30/PSLS_VKP_new.pdf. 11. Кривилев М. Д. Управление лазерным спеканием металлических порошковых смесей / М. Д. Кривилев, Е. В. Харанжевский, Г. А. Гордеев, В. Е. Анкудинов // Управление большими системами. – 2010. – Вып. 31. – С. 299-322.

References (transliterated): 1. Dovbyish V. M. et al. Additivnyie tehnologii i izdeliya iz metalla. Biblioteka liteyschika. No. 8. 2014. pp. 40-52. 2. 3D Today. Web. <http://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology/> 3. Z Corporation 3D print Technology. Web. <<http://www.cybercom.ru>> 4. Dovbyish V. M. et al. Additivnyie tehnologii i izdeliya iz metalla. Biblioteka liteyschika. No. 9. 2014. pp. 31-45. 5. Dovbyish V. M. et al. Additivnyie tehnologii i izdeliya iz metalla. Biblioteka liteyschika. No. 11. 2014. pp. 57-69. 6. Zelenko M. A., P. V. Zabednov. Additivnyie tehnologii v opytном lityemom proizvodstve. Tehnologii litya metallov i plastmass s ispolzovaniem sintez-modeley i sintez-form. Metallurgiya mashinostroyeniya. No. 5. 2013. pp. 37-45. 7. Production of objects using lamination. Web. <<http://3dpr.ru/izgotovlenie-obektov-s-ispolzovaniem-laminirovaniya>> 8. Technologies of 3D-print. Web. <<http://q99.it/7zINk1p>> 9. Ivanova A. M. et al. Fizicheskie osobennosti selektivnogo lazernogo spekaniya poroshkovyih metall-polimernyih kompozitsiy. Kvantovaya elektronika. No. 5. 1998. pp. 433-438. 10. Antonov, E. N. et al. Razrabotka metoda poverhnostnogo lazernogo spekaniya dlya formirovaniya matrits tkaney inzhenernyih konstruksiy. 30 let IPLIT RAN. Web. <http://www.laser.ru/30/PSLS_VKP_new.pdf> 11. Krivilev M. D. et al. Upravlenie lazernym spekaniem metallicheskikh poroshkovyih smesey. Upravlenie bolshimi sistemami. Vol. 31. 2010. pp. 299-322.

Поступила (received) 06.04.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Олейник Виталий Анатольевич – инженер-технолог группы подготовки и обеспечения 3D-принтеров отдела металлургии; ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект», Николаев, тел.: (050) 493-41-66; e-mail: ova223@gmail.com.

Oliinyk Vitalii Anatoliyovich – engineer-technologist of group of preparation and maintainance of 3D-printers of metallurgy departmnet; SE GTSPC «Zorya» – «Mashproekt», Mykolaiv, tel.: (050) 493-41-66; e-mail: ova223@gmail.com.

Сизоненко Ольга Николаевна – ведущий научный сотрудник; доктор технических наук, профессор, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины, г. Николаев, тел.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

Syzonenko Olga Mykolayivna – Leading Researcher; Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv, tel.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

Мяльница Георгий Филлипович – главный металлург комплекса; Академик АИН Украины, кандидат технических наук, доцент, ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект», г. Николаев, тел.: (050)418-22-30; e-mail: bas@zorya.com.ua.

Myalnytsya Heorhii Pylypovych – Main Metallurgist of Complex; Academician of Ac.Eng.Sc., PhD, assistant professor, SE GTSPC «Zorya» – «Mashproekt», Mykolaiv, tel.: (050)418-22-30; e-mail: bas@zorya.com.ua.

УДК 551.594

А. А. ПЕТКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРАЖЕНИЯ СТЕРЖНЯ РАЗРЯДОМ ДЛИННОЙ ИСКРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОШАГОВОЙ МОДЕЛИ

Разработана многошаговая модель для определения вероятности поражения стержневого электрода, расположенного на плоскости, в полеобразующей системе электродов «стержень – плоскость». Показано, что предложенная модель позволяет адекватно описывать вероятность поражения стержневого объекта в разрядном промежутке длиной $H = 3 - 15$ м при соосном расположении электродов-стержней в полеобразующей системе. Близкие значения вариативного параметра K_s при моделировании наблюдаемых в экспериментах значений вероятности поражения $p^* = 1$ позволяют считать одинаковыми процессы, приводящие к поражению стержня вне зависимости от размеров электродной системы и параметров импульсов напряжения, применяемых при испытаниях. Материалы работы могут быть использованы для дальнейших исследований поражения длинной искрой объектов, расположенных на плоской поверхности.

Ключевые слова: математическая модель, вероятность поражения, доверительный интервал, разряд длинной искры.

Введение. В настоящее время защите от прямого поражения молнией различных объектов и, в первую очередь, электроэнергетических систем уделяется большое внимание, что отражено в ряде национальных [1, 2] и международных нормативных документах [3]. Следует отметить неоднозначность подходов к вопросам молниезащиты в различных документах. Последнее обстоятельство свидетельствует о необходимости совершенствования моделей поражения молнией объектов, на основании которых формируются требования к молниезащите.

Анализ предварительных исследований и литературы. Исследованиям поражения стержневого объекта разрядом длинной искры, имитирующем разряд молнии, посвящен ряд работ. Традиционно такие исследования проводятся с использованием системы электродов «стержень – плоскость» с размещением на плоскости стержня-объекта. В дальнейшем анализируются работы, содержащие результаты испытаний, при проведении которых стержень-объект располагался соосно с высоковольтным стержнем-электродом, с которого развивался разряд длинной искры.

В работе [4] приведены данные испытаний по поражению стержневого объекта в разрядном промежутке длиной 15 м. На рис. 1 (график 1) показана зависимость вероятности поражения стержня-объекта от отношения длины разрядного промежутка H к высоте

объекта стержня h (диаметр стержня-объекта равнялся $d_s = 10$ мм).

В работе [5] приведены данные (рис. 1, график 2) по поражению стержневого объекта в разрядном промежутке длиной 5 м. При исследованиях использовались в основном импульсы напряжения положительной полярности: аperiodические импульсы 250/2500 мкс и колебательные импульсы 4000/6500 мкс.

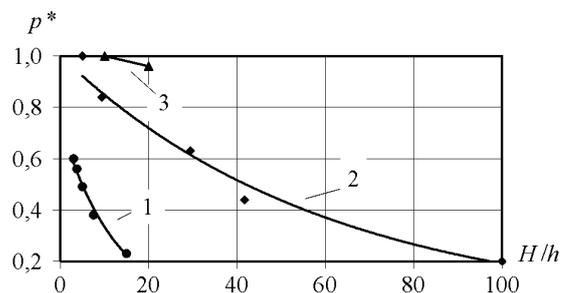


Рисунок 1 – Наблюдаемая вероятность поражения стержневого объекта в различных экспериментах

Наряду с обширными данными испытаний, результаты которых приведены в [4, 5], в литературе имеется информация по поражению стержневых объектов при ограниченном ряде значений отношения H/h .

В [6] указано, что в проведенных экспериментах

Сизоненко Ольга Николаевна – ведущий научный сотрудник; доктор технических наук, профессор, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины, г. Николаев, тел.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

SyzonenkoOlhaMykolayivna – Leading Researcher; Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv, tel.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

Мяльница Георгий Филлипович – главный металлург комплекса; Академик АИН Украины, кандидат технических наук, доцент, ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект», г. Николаев, тел.: (050)418-22-30; e-mail: bas@zorya.com.ua.

Myalnytsya Heorhii Pylypovych – Main Metallurgist of Complex; Academician of Ac.Eng.Sc., PhD, assistant professor, SE GTSPC «Zorya» – «Mashproekt», Mykolaiv, tel.: (050)418-22-30; e-mail: bas@zorya.com.ua.

УДК 551.594

А. А. ПЕТКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРАЖЕНИЯ СТЕРЖНЯ РАЗРЯДОМ ДЛИННОЙ ИСКРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОШАГОВОЙ МОДЕЛИ

Разработана многошаговая модель для определения вероятности поражения стержневого электрода, расположенного на плоскости, в полеобразующей системе электродов «стержень – плоскость». Показано, что предложенная модель позволяет адекватно описывать вероятность поражения стержневого объекта в разрядном промежутке длиной $H = 3 - 15$ м при соосном расположении электродов-стержней в полеобразующей системе. Близкие значения вариативного параметра K_s при моделировании наблюдаемых в экспериментах значениях вероятности поражения $p^* = 1$ позволяют считать одинаковыми процессы, приводящие к поражению стержня вне зависимости от размеров электродной системы и параметров импульсов напряжения, применяемых при испытаниях. Материалы работы могут быть использованы для дальнейших исследований поражения длинной искрой объектов, расположенных на плоской поверхности.

Ключевые слова: математическая модель, вероятность поражения, доверительный интервал, разряд длинной искры.

Введение. В настоящее время защите от прямого поражения молнией различных объектов и, в первую очередь, электроэнергетических систем уделяется большое внимание, что отражено в ряде национальных [1, 2] и международных нормативных документах [3]. Следует отметить неоднозначность подходов к вопросам молниезащиты в различных документах. Последнее обстоятельство свидетельствует о необходимости совершенствования моделей поражения молнией объектов, на основании которых формируются требования к молниезащите.

Анализ предварительных исследований и литературы. Исследованиям поражения стержневого объекта разрядом длинной искры, имитирующем разряд молнии, посвящен ряд работ. Традиционно такие исследования проводятся с использованием системы электродов «стержень – плоскость» с размещением на плоскости стержня-объекта. В дальнейшем анализируются работы, содержащие результаты испытаний, при проведении которых стержень-объект располагался соосно с высоковольтным стержнем-электродом, с которого развивался разряд длинной искры.

В работе [4] приведены данные испытаний по поражению стержневого объекта в разрядном промежутке длиной 15 м. На рис. 1 (график 1) показана зависимость вероятности поражения стержня-объекта от отношения длины разрядного промежутка H к высоте

объекта стержня h (диаметр стержня-объекта равнялся $d_s = 10$ мм).

В работе [5] приведены данные (рис. 1, график 2) по поражению стержневого объекта в разрядном промежутке длиной 5 м. При исследованиях использовались в основном импульсы напряжения положительной полярности: аperiodические импульсы 250/2500 мкс и колебательные импульсы 4000/6500 мкс.

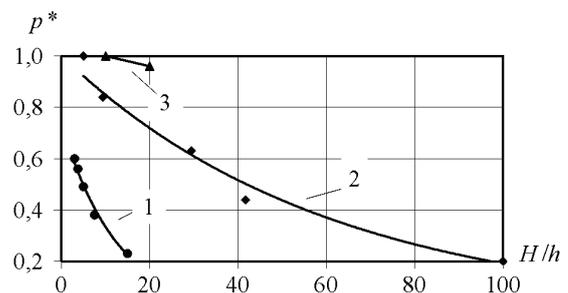


Рисунок 1 – Наблюдаемая вероятность поражения стержневого объекта в различных экспериментах

Наряду с обширными данными испытаний, результаты которых приведены в [4, 5], в литературе имеется информация по поражению стержневых объектов при ограниченном ряде значений отношения H/h .

В [6] указано, что в проведенных экспериментах

при длине промежутка $H = 10$ и 15 м и отношении $H/h = 5$ и 10 , вероятность поражения стержневого объекта при его соосном расположении с высоковольтным электродом не превышает $0,62$ и $0,5$ соответственно. Опыты проводились с импульсом колебательного затухающего напряжения при длине фронта первого полупериода положительной полярности 3000 мкс.

В работе [7] приведена зависимость вероятности поражения стержневого объекта от величины разрядного промежутка H при отношении $H/h = 10$. Во время проведения экспериментов длина разрядного промежутка варьировалась в интервале от $2,5$ до 15 м. Опыты проводились с импульсом колебательного затухающего напряжения при длине фронта первого полупериода положительной полярности 3000 мкс.

В работе [8] приведены экспериментальные зависимости поражения стержня при длине разрядного промежутка $H = 3$ м и высоте объекта-стержня $h = 0,15$ и $0,3$ м (рис. 1, график 3). Диаметр стержня-объекта в обоих случаях равнялся $d_s = 20$ мм. В экспериментах использовался аperiodический импульс напряжения $205/1900$ мкс.

Как показывает проведенный анализ, имеется обширная база экспериментальных данных по поражению стержневых объектов разрядом длинной искры. В связи с этим представляется целесообразным обобщенное описание имеющихся данных.

Цель работы. Разработка многошаговой модели поражения стержневого объекта длинной искрой и исследование ее применимости для описания поражения длинной искрой объектов-стержней при иницировании разряда со стержневого электрода, соосного со стержнем-объектом.

Результаты исследований. Предложенная в данной работе модель базируется на многошаговой модели, разработанной автором для имитации поражение плоскости длинной искрой [9]. Как было показано в [9], разработанная модель позволяет адекватно описать распределение точек поражения плоскости разрядом длинной искры, развивающемся с высоковольтного электрода (стержня) в системе «стержень-плоскость». Исходная модель включает ступенчатое (многошаговое) движение искры в направлении, определяемом углом движения θ в вертикальной плоскости и углом ориентировки α в горизонтальной плоскости. Причем, вероятностное распределение угла движения θ определяется расстоянием D от точки начала движения искры на текущем шаге до точки плоскости в данном направлении, а угол ориентировки α равномерно распределен в интервале $[0, 2\pi)$. Модификация исходной модели для описания поражения стержневого объекта заключается в учете в вероятностном распределении значений углов θ и α наличия стержневого объекта, расположенного на плоскости, перпендикулярно к ней.

Определение вероятностного распределения значений угла движения θ производилось с использованием геометрической модели движения искры на текущем шаге, показанной на рис. 2.

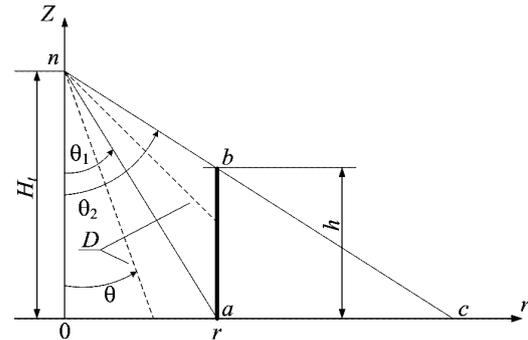


Рисунок 2 – Определение угла движения длинной искры: n – начальная точка движения искры на текущем шаге, H_i – высота над плоскостью начальной точки движения на текущем шаге, ab – стержень-объект, расположенный на плоскости

Функция распределения угла θ определится из соотношения

$$F(\theta) = \frac{\Omega_\theta(\theta)}{\Phi_\theta}, \quad \theta \in [0, \frac{\pi}{2}]. \quad (1)$$

где $\Omega_\theta(\theta)$ – область реализаций угла движения от 0 до значения θ ; Φ_θ – область всех возможных реализаций угла движения.

Для принятого в модели механизма движения искры (вероятность направления движения обратно пропорциональна $1/D^m$), указанные в (1) области могут быть описаны следующим образом (см. рис. 2):

$$\Phi_\theta = \int_0^{\theta_1} \frac{d\theta}{D^m} + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{D^m} + \int_{\theta_2}^{\pi/2} \frac{d\theta}{D^m}, \quad (2)$$

где углы θ_1 и θ_2 характеризуют место расположения и высоту стержня-объекта (рис. 2).

$$\Omega_\theta(\theta) = \begin{cases} \int_0^\theta \frac{d\theta}{D^m}, & 0 \leq \theta < \theta_1; \\ \int_0^{\theta_1} \frac{d\theta}{D^m} + \int_{\theta_1}^\theta \frac{d\theta}{D^m}, & \theta_1 \leq \theta < \theta_2; \\ \int_0^{\theta_1} \frac{d\theta}{D^m} + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{D^m} + \int_{\theta_2}^\theta \frac{d\theta}{D^m}, & \theta_2 \leq \theta < \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (3)$$

Определение вероятностного распределения значений угла ориентировки α производилось с использованием геометрической модели движения искры на текущем шаге, показанной на рис. 3.

Для принятого в модели механизма движения искры (вероятность направления движения обратно пропорциональна $1/D^m$), функция распределения угла α определится из соотношения (см. рис. 3):

$$F(\alpha) = \frac{\int_{\alpha_1}^\alpha \frac{d\alpha}{D^m}}{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{d\alpha}{D^m}}, \quad \alpha \in [\alpha_1, \alpha_2]. \quad (4)$$

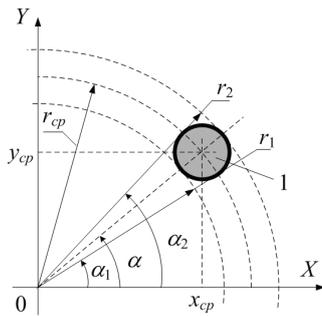


Рисунок 3 – Определение угла ориентировки длинной искры: 1 – стержень, перпендикулярный плоскости XOY

В целом, алгоритм движения искры соответствует алгоритму, описанному в [9]:

- на текущем шаге генерируются случайные значения углов θ_{sl} и α_{sl} , в соответствии с их распределениями (1) и (4);

- проверяется факт поражения плоскости и, если он имеет место, то переходим к новому акту движения искры из исходной точки, расположенной на высоте H (проверка подробно описана в [9]);

- проверяется факт поражения стержня, и если он имеет место, то переходим к новому акту движения искры из исходной точки, расположенной на высоте H (факт поражения фиксируется с целью дальнейшей обработки);

- если факт поражения плоскости или стержня не подтверждается, то начальная точка движения искры смещается на величину шага движения D_{st} в направлении, определяемом углами θ_{sl} и α_{sl} , и процесс движения повторяется.

Для установления факта поражения стержня-объекта искрой на текущем шаге движения осуществляется следующая проверка:

- $\theta_1 \leq \theta_{sl} \leq \theta_2$, луч случайного угла движения θ_{sl} , определяющий движение искры на текущем шаге, пересекает стержневой объект (рис. 2);

- $\alpha_1 \leq \alpha_{sl} \leq \alpha_2$, луч случайного угла ориентировки α_{sl} , определяющий движение искры на текущем шаге, пересекает стержневой объект (рис. 3);

- $D_{st} \geq D$, величина шага движения искры не меньше расстояния от точки начала движения до точки стержневого объекта (при выбранных θ_{sl} и α_{sl}) на текущем шаге движения.

Если указанные условия выполняются, то фиксируется факт поражения стержня.

В некоторых рассмотренных выше источниках, данные которых в дальнейшем используются для проверки адекватности предлагаемой модели, отсутствует информация о поперечном размере стержневого объекта, необходимая для определения угла ориентировки, поэтому, опираясь на аналогичные эксперименты с известными данными, при моделировании диаметр объекта-стержня принимался равным $d_s = 10$ мм.

Для проведения численного моделирования в соответствии с описанным алгоритмом была разработана компьютерная программа в среде *Excel* с использованием *Visual Basic for Application*.

В предлагаемой модели, как и в модели [9], име-

ется два вариативных параметра: показатель степени m и величина шага движения искры D_{st} . Предварительные расчеты показали, что в качестве значений вариативного параметра модели m может быть принято его значение, полученное в [9] при моделировании поражения плоскости с подобной электродной системой («стержень – плоскость») и в данной работе использовалось значение $m = 17$. В процессе моделирования изменялось значение коэффициента шага $K_{st} = D_{st}/H$ с целью достижения наилучшего совпадения расчетных и экспериментальных данных.

Рассмотренные выше экспериментальные данные получены при ограниченном количестве опытов и при увеличении количества разрядов наблюдаемые значения вероятности поражения стержневых объектов p^* могут измениться. Поэтому при дальнейшем рассмотрении, учитывая статистический характер экспериментальных данных, для каждого экспериментального значения в соответствии с методикой [10, 11] был построен доверительный интервал для вероятности поражения стержня (p_1, p_2) при доверительной вероятности $\beta = 0,99$.

Для данных, приведенных в [4], на рис. 4 показаны доверительные границы и результаты моделирования.

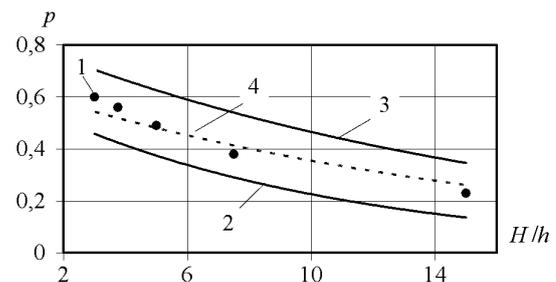


Рисунок 4 – Вероятности поражения стержня-объекта по данным экспериментов [4] при $H = 15$ м

На рис. 4 и в дальнейшем на рис. 5–7 обозначено: 1 – наблюдаемые экспериментальные данные – p^* , 2 – нижняя граница доверительного интервала – p_1 , 3 – верхняя граница доверительного интервала – p_2 , 4 – результат моделирования.

Результаты моделирования, показанные на рис. 4 получены при изменении коэффициента шага в интервале 0,33 – 0,41.

Результаты моделирования данных, приведенных в [5], показаны на рис. 5.

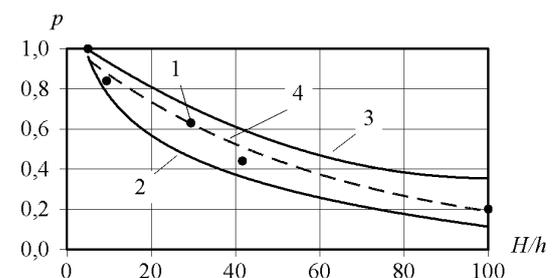


Рисунок 5 – Вероятности поражения стержня-объекта по данным экспериментов [5] при $H = 5$ м

При моделюванні значення коефіцієнта шага змінювались в інтервалі 0,21 – 0,35.

Для даних, приведених в [8], результати моделювання показані на рис. 6.

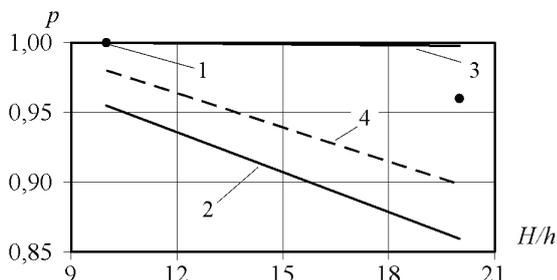


Рисунок 6 – Вероятности поражения стержня-объекта по данным экспериментов [8] при $H = 3$ м

При моделюванні значення коефіцієнта шага рavnялось 0,2.

Результаты моделирования данных, приведенных в [7], показано на рис. 7.

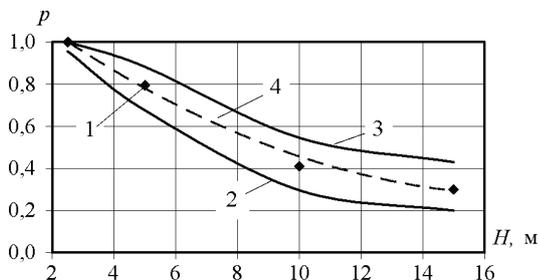


Рисунок 7 – Вероятности поражения стержня-объекта по данным экспериментов [7] при $H/h = 10$

При моделюванні значення коефіцієнта шага змінювались в інтервалі 0,21 – 0,49.

Как видно из рис. 4 – 7, результаты моделирования располагаются между нижней и верхней доверительными границами вероятности поражения стержня, что позволяет признать предложенную модель адекватной исходным данным.

Результаты моделирования указывают на такую особенность, что для больших значений вероятности поражения стержневого объекта (наблюдаемые в экспериментах значения $p^* = 1$ [5, 7, 8]) коэффициент шага движения изменялся в достаточно узком интервале $K_{st} = 0,2 - 0,22$ для $H = 2,5 - 5$ м и $H/h = 5 - 10$. Близкие значения K_{st} позволяют считать одинаковыми процессы, приводящие к поражению стержня всеми разрядами длинной искры вне зависимости от размеров электродной системы и параметров используемых при испытаниях импульсов напряжения.

В рассмотренных выше источниках отсутствуют данные по поражению стержня с наблюдаемой вероятностью $p^* = 1$ при $H > 5$ м. Предложенная модель позволяет рассмотреть задачу взаимосвязи размеров элементов электродной системы при больших значениях H , для варианта поражения объекта-стержня всеми разрядами длинной искры, имеющих одну и ту же исходную точку (с вероятностью такого события близкой к 1). Учитывая область адекватности предло-

женной модели, решение задачи будет иметь характер прогноза.

Для решения данной задачи проводилось моделирование при $K_{st} = 0,22$. Объект-стержень считался пораженным всеми разрядами, если вероятность такого события находилась в интервале (0,97 – 1,0), что составляло минимальный доверительный интервал при обработке экспериментальных данных с наблюдаемой вероятностью $p^* = 1$.

На рис. 8 показана взаимосвязь размеров электродной системы при поражении объекта-стержня с вероятностью близкой к 1. На рис. 8 (и далее на рис. 9) обозначено: 1 – экспериментальные данные; 2 – данные моделирования; 3 – кривая, аппроксимирующая в совокупности данные эксперимента и моделирования. Как видно из рисунка, при увеличении высоты точки начала движения длинной искры (в физическом эксперименте – высоты подвеса высоковольтного электрода) высота поражаемого объекта-стержня увеличивается и достигает примерно половины разрядного промежутка.

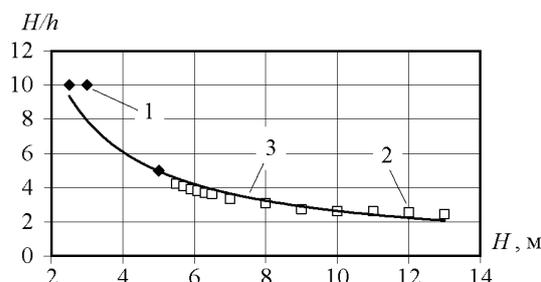


Рисунок 8 – Взаимосвязь размеров электродной системы

Аппроксимирующая кривая 3 при коэффициенте детерминированности $r^2 = 0,94$ может быть описана выражением

$$H/h = 21,7H^{0,91} \tag{5}$$

Зависимость (5) может быть использована при подготовке натуральных экспериментов по поражению объектов длинной искрой.

На рис. 9 показана зависимость наибольшего расстояния между стержнями $A = H - h$, которое обеспечивает поражение объекта-стержня с вероятностью близкой к 1, от высоты точки начала движения искры H .

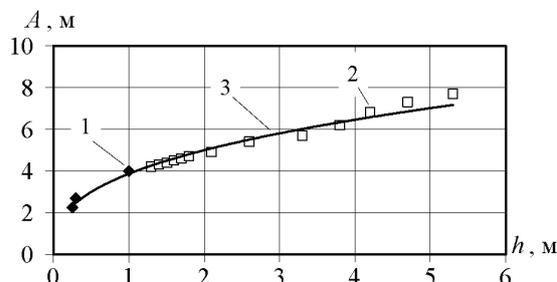


Рисунок 9 – Взаимосвязь расстояния между стержнями и высоты объекта-стержня

Аппроксимирующая кривая 3 при коэффициенте детерминированности $r^2 = 0,98$ может быть описана выражением

$$A = 3,87h^{0,37}. \quad (6)$$

Трансформируя полученные результаты в область расчетов молниезащиты с использованием метода катящейся сферы [1, 3], для варианта появления поражающего разряда молнии, развивающегося из точки пространства, расположенной на оси стержневого молниеотвода, можно предположить, что значения A , рассчитанные по выражению (6), является дистанцией поражения (расстоянием ориентировки), так как в экспериментах и при моделировании вероятность поражения объекта-стержня (стержневого молниеотвода) близка к 1.

Выводы.

1. Разработана многошаговая модель определения вероятности поражения стержневого электрода, расположенного на плоскости, в полеобразующей системе электродов «стержень – плоскость».

2. Показано, что предложенная многошаговая модель позволяет адекватно описывать вероятность поражения стержневого объекта в разрядном промежутке длиной от $H = 3 - 15$ м при соосном расположении электродов-стержней в полеобразующей системе.

3. Близкие значения вариативного параметра K_{st} при моделировании наблюдаемых в экспериментах значениях вероятности поражения $p^* = 1$ позволяют считать одинаковыми процессы, приводящие к поражению стержня вне зависимости от размеров электродной системы и параметров импульсов напряжения, применяемых при испытаниях.

Материалы работы могут быть использованы для дальнейших исследований поражения длинной искрой объектов, расположенных на плоской поверхности.

Список литературы: 1. Улаштування у блискавкозахисту будівельних споруд (IEC 62305:2006, NEQ): DSTU B V.2.5-38:2008. – [Чинний від 2008–01–01]. – К. : Мінірегіонбуд України, 2008. – 63 с. 2. NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. 108 p. 3. IEC 62305-3, Ed. 1: Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard. – IEC, 2004. – 150 p. 4. Куприенко В.М. Методика и результаты испытаний по определению угла защиты α для отдельно стоящих стержневых и тросовых молниеотводов / В.М. Куприенко // Вісник НТУ «ХПІ» Тематичний випуск «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х. : НТУ «ХПІ». – 2006. – № 17. – С. 24 – 32. 5. Волкова О.В. Поражаемость искровым разрядом стержня на плоскости / О.В. Волкова, А.Р. Корявин // Электричество. – 1991. – № 5. – С. 1152-1155. 6. Александров Г.Н. Об ориентировке канала длинной искры / Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, Э.М. Базелян, Е.С. Садыхова // Электричество. – 1973. – № 3. – С. 63-66.

7. Александров Г.Н. К вопросу об оценке защитного действия молниеотводов / Г.Н. Александров, М.М. Зеленецкий, В.Л. Иванов и др. // Известия академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1970. – №3. – С. 48 – 54. 8. 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. Зинковский и др. // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х. : НТУ «ХПІ». – 2013. – №27. – С. 11 – 20. 9. Петков А.А. Моделирование поражения плоскости разрядом длинной искры с использованием многошаговой модели / А.А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х. : НТУ «ХПІ». – 2015. – №51. – С. 78 – 82. 10. Korn, G. Mathematical handbook for scientists and engineers / G. Korn, T. Korn. – N. Y. : McGraw-Hill Book Company, 1968. – 832 p. 11. Hauschild V. Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik / V. Hauschild, V. Mosch. – Berlin. : VEB Verlag Technik, 1984. – 312 s.

Bibliography (transliterated): 1. Ulashtuvannya bliskavkozahistu budivell sporud (IEC 62305:2006, NEQ): DSTU B V.2.5-38:2008. [Chinniy vid 2008–01–01]. Kyiv: Minoregionbud Ukraini, 2008. 63 p. 2. NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. 108 p. 3. IEC 62305-3, Ed. 1: Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard. IEC, 2004. 150 p. 4. Kuprienko V.M. Metodika i rezultaty ispytaniy po opredeleniyu ugla zaschity α dlya otdelno stoyaschih stержnevyyh i trosovyh molnieotvodov. V.M. Kuprienko. Visnik NTU "KhPI". Tematichniy vipusk "Tehnika ta elektrofizika visokih naprug". Kharkiv: NTU "KhPI". 2006. No 17. pp. 24-32. 5. Volkova O.V. Porazhaemost iskrovym razryadom stержnnya na ploskosti O.V. Volkova, A.R. Koryavin, Elektrichestvo. 1991. No 5. pp. 1152-1155. 6. Aleksandrov G.N. Ob orientirovke kanala dlinnoy iskry G.N. Aleksandrov, V.L. Ivanov, E.M. Bazelyan, E.S. Sadyhova. Elektrichestvo. 1973. No 3. pp. 63-66. 7. Aleksandrov G.N. K voprosu ob ocnke zaschitnogo deystviya molnieotvodov. G.N. Aleksandrov, M.M. Zeleneckiy, V.L. Ivanov i dr. Izvestiya akademii nauk SSSR. Energetika i transport. 1970. No 3. pp. 48-54. 8. Baranov M.I. Eksperimentalnye issledovaniya porazheniya zazemlennoy ploskosti i razmeschennyh na ney obektov elektricheskim razryadom v dlinnom promezhtke. M.I. Baranov, V.I. Docenko, V.M. Zinkovskiy i dr. Visnik NTU "KhPI". Tematichniy vipusk "Tehnika ta elektrofizika visokih naprug". Kharkiv: NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 11-20. 9. Petkov A.A. Modelirovanie porazheniya ploskosti razryadom dlinnoy iskry s ispolzovaniem mnogoshagovoy modeli. A.A. Petkov. Visnik NTU "KhPI". Tematichniy vipusk "Tehnika ta elektrofizika visokih naprug". Kharkiv: NTU "KhPI". 2015. No 51. pp. 78-82. 10. Korn, G. Mathematical handbook for scientists and engineers. G. Korn, T. Korn. New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. 832 p. 11. Hauschild V. Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik. V. Hauschild, V. Mosch. Berlin: VEB Verlag Technik, 1984. – 312 p.

Поступила (received) 31.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Петков Александр Александрович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Инженерная электрофизика», НТУ «ХПІ»; тел.: (067) 572–00–58; email: apetkov@yandex.ua.

Petkov Alexander Alexandrovich – Doctor of technical sciences, Senior researcher, Professor of the Department "Engineering Electrophysics", NTU "KhPI"; tel.: (067) 572–00–58; email: apetkov@yandex.ua.

УДК 534.231/534-16 + 621.373

О.Н. ПЕТРИЦЕВ, В.В. ПИЛИНСКИЙ, А.С. ЧУПАХИН

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО ВИБРИРУЮЩИМ ФЕРРОМАГНИТНЫМ ДИСКОМ

Показано, что источниками низкочастотных электромагнитных помех могут быть металлические элементы радиоэлектронной аппаратуры, которые совершают механические колебания (вибрируют) в присутствии постоянного магнитного поля. В данной работе на примере колеблющегося ферромагнитного диска, рассмотрены последовательности вычислительных процедур, которые позволяют определить амплитуду переменной намагниченности вибрирующего диска и уровни переменного магнитного поля в окружающем пространстве.

Ключевые слова: электромагнитная обстановка; источник помех; звуковой диапазон; механические вибрации; магнитное поле; ферромагнитный диск.

Введение. В результате многочисленных исследований электромагнитных помех в объеме помещений с радиоэлектронной аппаратурой [1-3] выявлено наличие низкочастотных электромагнитных полей звукового частотного диапазона. Установлено, что электромагнитные помехи килогерцового частотного диапазона сгенерированы источниками в составе комплекса радиоэлектронной аппаратуры. Источниками низкочастотных электромагнитных помех могут быть металлические элементы радиоэлектронной аппаратуры, которые совершают механические колебания (вибрируют) в присутствии постоянного магнитного поля.

Предположим, что ферромагнитный диск вибрирует в постоянном или низкочастотном переменном магнитном поле. Ферромагнитные материалы нашли широкое применение в самых различных областях современной техники [4]. Механические вибрации предварительно намагниченного ферромагнетика сопровождаются деформациями малых объемов диска, что вызывает повороты магнитных доменов (обратный магнитострикционный эффект). Повороты магнитных доменов сопровождаются изменением магнитного поля рассеяния, которое существует в окрестности вибрирующего диска. Очевидно, что частота смены знака магнитного поля рассеяния будет в точности равна частоте смены знака напряженно-деформированного состояния в объеме вибрирующего ферромагнитного диска, то есть частоте механических вибраций. Причины возникновения механических вибраций представлены в [5]. В работе [6] выполнены измерения виброскорости в офисном помещении.

Цель данной работы: синтез характеристик низкочастотного магнитного поля, обусловленного вибрацией ферромагнитных компонентов радиоэлектронной аппаратуры.

1. Расчет переменного магнитного поля в окрестности колеблющегося диска. Изменяющаяся во времени по закону $e^{i\omega t}$ намагниченность колеблющегося ферромагнитного диска формирует в окружающем пространстве переменное электромагнитное поле, описываемое уравнениями Максвелла

$$\operatorname{rot} \vec{H}^e = i\omega \epsilon_0 \vec{E}^e; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E}^e = -i\omega \mu_0 \vec{H}^e, \quad (2)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м - диэлектрическая и магнитная постоянные; \vec{H}^e и \vec{E}^e - амплитудные значения изменяющихся во времени по закону $e^{i\omega t}$ векторов напряженности магнитной и электрической составляющей электромагнитного поля.

Из уравнений (1) и (2) следует, что

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{H}^e - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 \vec{H}^e = 0. \quad (3)$$

На частотах звукового диапазона $\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 \ll 1$, и уравнение (3) принимает вид

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{H}^e = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) на поверхностях диска $z = \pm h$ должно обеспечивать выполнение граничных условий

$$H_\rho^e(\rho, \pm h) = 0 \quad \forall \rho \leq R_0. \quad (5)$$

$$\mu_0 H_\rho^e(\rho, \pm h) - B_z(\rho, \pm h) = 0 \quad \forall \rho \leq R_0, \quad (6)$$

где $B_z(r, z) = B_z^V(r, z) + m_{33}^e H_z(r, z)$ - магнитная индукция в объеме колеблющегося ферромагнитного диска; компонент $H_z(\rho, z)$ определен выражением:

$$H_z(\rho, z) = H_0 W_z(\lambda, \rho, R_0) \sum_{k=0}^{\infty} p_k \frac{(\lambda \zeta_k)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4)} \sin(\alpha_k z).$$

Решение уравнения (4) целесообразно выполнить в сферической системе координат (ϑ, ϕ, r) , координатные линии которой показаны на рис. 1.

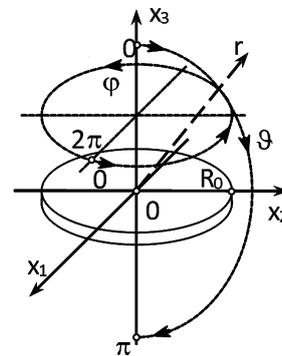


Рисунок 1 – Декартова и сферическая системы координат

Для определения характеристик поля в полупространстве $x_3 \geq h$ будет использована сферическая система координат, начало которой совмещено с центром верхней поверхности ферромагнитного диска. Для

переменного магнитного поля в полупространстве $x_3 \leq -h$, начало сферической системы координат совмещено с центром нижней ($z = -h$) поверхности диска.

Магнитное поле в окрестности колеблющегося диска не зависит от азимутальной координаты φ , поэтому векторное уравнение (4) распадается на два скалярных уравнения:

$$\frac{\operatorname{ctg} \vartheta}{r} \left[\frac{1}{r} H_{\vartheta}^e + \frac{\partial H_{\vartheta}^e}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r^e}{\partial \vartheta} \right] + \frac{1}{r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial H_{\vartheta}^e}{\partial \vartheta} + \frac{\partial^2 H_{\vartheta}^e}{\partial \vartheta \partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 H_r^e}{\partial \vartheta^2} \right] = 0. \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial H_{\vartheta}^e}{\partial r} \right) - r \frac{\partial^2 H_r^e}{\partial \vartheta \partial r} = 0, \quad (8)$$

где $H_{\vartheta}^e(\vartheta, r)$ и $H_r^e(\vartheta, r)$ - амплитудные значения полярного и радиального компонентов вектора $\vec{H}^e(\vartheta, r)$ напряженности осесимметричного переменного магнитного поля в окрестности колеблющегося ферромагнитного диска.

Из условия отсутствия магнитных зарядов, то есть условия $\operatorname{div} \vec{H}^e = 0$, следует, что между компонентами вектора $\vec{H}^e(\vartheta, r)$ существует линейная зависимость, то есть

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 H_r^e) = - \left[\operatorname{ctg} \vartheta H_{\vartheta}^e + \frac{\partial H_{\vartheta}^e}{\partial \vartheta} \right]. \quad (9)$$

С помощью соотношения (9) можно исключить из уравнения (7) компонент $H_{\vartheta}^e(\vartheta, r)$ и его производные по переменным r и ϑ . После этого уравнение (7) принимает вид

$$\frac{\partial^2 H_r^e}{\partial r^2} + \frac{4}{r} \frac{\partial H_r^e}{\partial r} + \frac{2}{r^2} H_r^e + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 H_r^e}{\partial \vartheta^2} + \operatorname{ctg} \vartheta \frac{\partial H_r^e}{\partial \vartheta} \right) = 0. \quad (10)$$

Следуя общепринятому методу разделения переменных [8], решение уравнения (10) можно представить в виде

$$H_r^e(\vartheta, r) = T(\vartheta)R(r), \quad (11)$$

где $T(\vartheta)$ и $R(r)$ - подлежащие определению функции.

Подставляя соотношение (11) в уравнение (10), получаем

$$T(\vartheta)FR(r) + \frac{R(r)}{r^2} FT(\vartheta) = 0, \quad (12)$$

где $FR(r) = \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{4}{r} \frac{\partial R}{\partial r} + \frac{2}{r^2} R$, $FT(\vartheta) = \frac{\partial^2 T}{\partial \vartheta^2} + \operatorname{ctg} \vartheta \frac{\partial T}{\partial \vartheta}$.

Рассмотрим функцию $FT(\vartheta)$.

Для функции $FT(\vartheta)$ перейдем к новой переменной $\xi = \cos \vartheta$, тогда:

$$FT(\xi) = - \left[(\xi^2 - 1) \frac{\partial^2 T(\xi)}{\partial \xi^2} + 2\xi \frac{\partial T(\xi)}{\partial \xi} \right]. \quad (13)$$

Добавим и вычтем в правой части выражения (13) комбинацию $\nu(\nu + 1)T(\xi)$, где $\nu = 0, 1, 2, \dots$ - элемент ряда натуральных чисел. Выражение (13) при-

нимает вид

$$FT(\xi) = - \left[(\xi^2 - 1) \frac{\partial^2 T(\xi)}{\partial \xi^2} + 2\xi \frac{\partial T(\xi)}{\partial \xi} - \nu(\nu + 1)T(\xi) \right] - \nu(\nu + 1)T(\xi). \quad (14)$$

В квадратной скобке выражения (14) записано уравнение Лежандра [9]. Если представить $T(\xi) = P_{\nu}(\xi)$, где $P_{\nu}(\xi)$ - функция Лежандра первого рода степени ν , то квадратная скобка в соотношении (14) обращается в нуль, а уравнение (12) имеет вид

$$\sum_{\nu} P_{\nu}(\xi) \left[\frac{\partial^2 R_{\nu}(r)}{\partial r^2} + \frac{4}{r} \frac{\partial R_{\nu}(r)}{\partial r} + \frac{2}{r^2} R_{\nu}(r) - \frac{\nu(\nu + 1)}{r^2} R_{\nu}(r) \right] = 0. \quad (15)$$

Известно [7], что функции Лежандра четных степеней ν не обращаются в нуль при $\xi = 0$. Функции Лежандра нечетных степеней ν , напротив, при $\vartheta = \pi/2$ ($\xi = 0$) принимают нулевые значения. Для того, чтобы определиться с символом ν в уравнении (15) примем во внимание то, что компоненты вектора напряженности \vec{H}^e переменного магнитного поля в окрестности колеблющегося диска в цилиндрической системе координат выразим через компоненты $H_r^e(r, \vartheta)$ и $H_{\vartheta}^e(r, \vartheta)$:

$$H_z^e = H_r^e \cos \vartheta - H_{\vartheta}^e \sin \vartheta, \\ H_{\rho}^e = H_r^e \sin \vartheta - H_{\vartheta}^e \cos \vartheta.$$

Для того, чтобы обеспечить выполнение граничного условия (5), то есть $H_{\rho}^e(\rho, h) = 0$, необходимо и достаточно положить в уравнении (15) значок $\nu = 1 + 2m$, где $m = 0, 1, 2, \dots$.

Очевидно, что сумма знакопеременного ряда (15) равна нулю, когда

$$\frac{\partial^2 R_m(r)}{\partial r^2} + \frac{4}{r} \frac{\partial R_m(r)}{\partial r} + \frac{2}{r^2} R_m(r) - \frac{\nu(\nu + 1)}{r^2} R_m(r) = 0, \quad (16)$$

где $\nu = 1 + 2m$.

Для удобства выполнения дальнейших вычислений, представим уравнение (16) в безразмерном, относительно аргумента искомой функции R_m , виде

$$x^2 \frac{\partial^2 R_m(x)}{\partial x^2} + 4x \frac{\partial R_m(x)}{\partial x} + [2 - \nu(\nu + 1)] R_m(x) = 0, \quad (17)$$

где $x = r/R_0$ - безразмерная радиальная координата; R_0 - радиус колеблющегося диска.

Подстановкой $R_m(x) = x^{-3/2} U_m(x)$ уравнение (17) приводится к стандартному уравнению Эйлера [9] относительно функции $U_m(x)$. Уравнение Эйлера

$$x^2 \frac{\partial^2 U_m(x)}{\partial x^2} + x \frac{\partial U_m(x)}{\partial x} - (2m + 3/2)^2 U_m(x) = 0$$

имеет своим общим решением функцию

$$U_m(x) = C_m x^{2m+3/2} + D_m x^{-(2m+3/2)}, \quad (18)$$

где C_m и D_m - подлежащие определению константы. Очевидно, что во внутренней области $0 \leq x \leq 1$, то есть внутри полусферы радиуса R_0 , функция $U_m(x) = U_m^{(-)}(x) = C_m x^{2m+3/2}$. Во внешней области $x > 1$ функция $U_m(x) = U_m^{(+)}(x) = D_m x^{-(2m+3/2)}$. На по-

верхности полусферы $x = 1$ должно выполняться очевидное равенство $U_m^{(-)}(1) = U_m^{(+)}(1)$, откуда следует, что $C_m = D_m$.

Искомая функция $R_m(x)$ может быть найдена следующим образом

$$R_m(x) = \begin{cases} C_m x^{2m} \forall x \in [0, 1], \\ C_m x^{-(2m+3)} \forall x > 1. \end{cases}$$

Таким образом, искомый радиальный компонент $H_r^e(r, \vartheta)$ задается выражением

$$H_r^e(r, \vartheta) = \begin{cases} \sum_{m=0}^{\infty} C_m \left(\frac{r}{R_0}\right)^{2m} P_{1+2m}(\xi) \forall r \in [0, R_0], \\ \sum_{m=0}^{\infty} C_m \left(\frac{r}{R_0}\right)^{-(2m+3)} P_{1+2m}(\xi) \forall r > R_0. \end{cases} \quad (19)$$

Рассмотрим уравнение (8). Очевидно, что его можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(x^2 \frac{\partial H_g^e}{\partial x} \right) = x \frac{\partial^2 H_r^e}{\partial x \partial \vartheta}. \quad (20)$$

Решение уравнения (20) осуществляется последовательным интегрированием правой части по переменной x .

Для внутренней области $0 \leq x \leq 1$ имеем

$${}^{(-)}H_g^e(r, \vartheta) = -\sin \vartheta \sum_{m=0}^{\infty} C_m \left[\frac{x^{2m}}{2m+1} - \frac{q_1^{(m)}}{x} + q_2^{(m)} \right] \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi},$$

где $q_1^{(m)}$ и $q_2^{(m)}$ - константы интегрирования. Очевидно, что $q_1^{(m)} = 0$ и

$${}^{(-)}H_g^e(r, \vartheta) = -\sin \vartheta \sum_{m=0}^{\infty} C_m \left[\frac{1}{2m+1} \left(\frac{r}{R_0}\right)^{2m} + q_2^{(m)} \right] \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi} \forall r \in [0, R_0]. \quad (21)$$

Для области $r > R_0$ формула для расчета полярного компонента вектора напряженности переменного магнитного поля имеет вид

$${}^{(+)}H_g^e(r, \vartheta) = -\sin \vartheta \sum_{m=0}^{\infty} C_m \left[-\frac{x^{-(2m+3)}}{2m+2} - \frac{q_3^{(m)}}{x} + q_4^{(m)} \right] \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi},$$

где $q_3^{(m)}$ и $q_4^{(m)}$ - константы интегрирования. Очевидно, что $q_4^{(m)} = 0$ и

$${}^{(+)}H_g^e(r, \vartheta) = -\sin \vartheta \sum_{m=0}^{\infty} C_m \left[-\frac{1}{2m+2} \left(\frac{r}{R_0}\right)^{-(2m+3)} - \frac{q_3^{(m)}}{(r/R_0)} \right] \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi} \forall r > R_0. \quad (22)$$

Постоянные интегрирования $q_2^{(m)}$ и $q_3^{(m)}$ находят из условий сопряжения решений на поверхности полусферы $x = 1$

$${}^{(-)}H_g^e(1, \vartheta) = {}^{(+)}H_g^e(1, \vartheta),$$

$$\frac{\partial}{\partial x} {}^{(-)}H_g^e(x, \vartheta) \Big|_{x=1} = \frac{\partial}{\partial x} {}^{(+)}H_g^e(x, \vartheta) \Big|_{x=1},$$

откуда следует, что $q_2^{(m)} = 0$ и

$q_3^{(m)} = -\frac{4m+3}{(2m+1)(2m+2)}$. С учетом этого соотношения (21) и (22) принимают вид

$${}^{(-)}H_g^e(r, \vartheta) = -\sin \vartheta \sum_{m=0}^{\infty} \frac{C_m}{2m+1} \left(\frac{r}{R_0}\right)^{2m} \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi} \forall r \in [0, R_0], \quad (23)$$

$${}^{(+)}H_g^e(r, \vartheta) = -\sin \vartheta \sum_{m=0}^{\infty} \frac{C_m}{2m+2} \left[-\left(\frac{r}{R_0}\right)^{-(2m+3)} + \left(\frac{4m+3}{2m+1}\right) \left(\frac{r}{R_0}\right)^{-1} \right] \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi} \forall r > R_0. \quad (24)$$

Выражения (19) и (23) обеспечивают автоматическое выполнение граничного условия (5). Соответствующим подбором констант C_m можно обеспечить приближенное выполнение условий (6).

Входящий в состав условия (6) аксиальный компонент вектора магнитной индукции $B_z(\rho, h)$ запишем в виде

$$B_z(\rho, h) = B_z^V(\rho, h) + \mu_0^e H_z(\rho, h) = B_0 \psi \left[J_0(\lambda \rho) I_1(\lambda R_0) - I_0(\lambda \rho) J_1(\lambda R_0) \right], \quad (25)$$

где $B_0 = U_0 H_z^0 \frac{hm_2 \lambda^2}{D(\lambda R_0)}$; $\psi = 1 + \sum_{k=0}^{\infty} p_k \frac{(-1)^k (\lambda \zeta_k)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4)}$.

Известно [7], что функции Бесселя $J_0(q_n x)$, где q_n - n -ый корень уравнения $J_0(z) = 0$ (n -ый нуль функции Бесселя нулевого порядка), образуют систему ортогональных функций на интервале $0 \leq x \leq 1$, то есть существует интеграл

$$\int_0^1 x J_0(q_k x) J_0(q_n x) dx = \begin{cases} 0 \forall k \neq n, \\ J_1^2(q_n)/2 \text{ при } k=n. \end{cases} \quad (26)$$

Соотношения (26) позволяют записать выражение (25) в виде

$$B_z(\rho, h) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} B_n J_0(q_n x), \quad (27)$$

где $B_n = B_0 \psi \frac{q_n}{J_1(q_n)} \left[\frac{I_1(\lambda R_0) J_0(\lambda R_0)}{(\lambda R_0)^2 - q_n^2} - \frac{I_0(\lambda R_0) J_1(\lambda R_0)}{(\lambda R_0)^2 + q_n^2} \right]$.

При этом граничные условия (6) принимают вид

$$2 \sum_{n=1}^{\infty} B_n J_0(q_n x) = \mu_0 \sum_{m=0}^{\infty} C_m (-1)^m \frac{(2m)!}{4^m (m!)^2} x^{2m}, \quad (28)$$

где $\left[\sin \vartheta \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi} \right]_{\xi=0} = (2m+1)(-1)^m \frac{(2m)!}{4^m (m!)^2}$.

Умножим левую и правую части равенства (28) на произведение $x J_0(q_n x)$ и проинтегрируем полученные результаты по переменной x в пределах от нуля до единицы. После выполнения этих действий можно записать, что

$$\sum_{m=0}^{\infty} C_m \beta_{mn} = \frac{B_n}{\mu_0}, \quad (29)$$

где $\beta_{mn} = (-1)^m \frac{(2m)!}{4^m (m!)^2 J_1^2(q_n)} \int_0^1 x^{2m+1} J_0(q_n x) dx$.

Уравнение (29) позволяет приближенно опреде-

лить первые $M + 1$ коэффициентов C_m . Действительно, равенство (29) можно приближенно записать в следующем виде

$$\begin{aligned} C_0\beta_{01} + C_1\beta_{11} + C_2\beta_{21} + \dots + C_M\beta_{M1} &= B_1/\mu_0, \\ C_0\beta_{02} + C_1\beta_{12} + C_2\beta_{22} + \dots + C_M\beta_{M2} &= B_2/\mu_0, \\ C_0\beta_{03} + C_1\beta_{13} + C_2\beta_{23} + \dots + C_M\beta_{M3} &= B_3/\mu_0, \\ &\dots \\ C_0\beta_{0n} + C_1\beta_{1n} + C_2\beta_{2n} + \dots + C_M\beta_{Mn} &= B_n/\mu_0, \\ C_0\beta_{0M} + C_1\beta_{1M} + C_2\beta_{2M} + \dots + C_M\beta_{MM} &= B_M/\mu_0 \end{aligned} \quad (30)$$

где $M = n + 1$.

Система линейных алгебраических уравнений (30) разрешена относительно искомым констант $C_0, C_1, C_2, \dots, C_M$ единственным образом и обеспечивает получение данных об электромагнитной обстановке создаваемой ферромагнитным диском постоянного магнитного поля.

Выводы. На примере ферромагнитного диска, совершающего осесимметричные колебания поперечного изгиба, рассмотрены последовательности вычислительных процедур, которые позволяют определить амплитуду переменной намагниченности колеблющегося диска и уровни переменного магнитного поля в окружающем его пространстве.

Список литературы: 1. Маслов М. Ю. Численный анализ электромагнитной обстановки в офисном помещении / М. Ю. Маслов // Vestnik SONIIR 2004. – № 1 – С. 162-168. 2. Антипова, С.Е. Методы прогнозирования электромагнитной обстановки на рабочих местах предприятий электроэнергетики и связи / С.Е. Антипова, В.А. Романов // Радиотехника. 2001. – № 9. – С. 81–85. 3. Пилинский В.В. Особенности обеспечения электромагнитной совместимости современного киноконцертного комплекса. Часть 2 – Формирование электромагнитной обстановки силовыми цепями киноконцертного оборудования / В.В. Пилинский, М.В. Родионова, А.С. Чупахин // Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность» – 2009. – № 4. – С. 3-9. 4. R. Cantieni T. Biro Office floor vibrations: modal parameter identification and vibration monitoring Available at: http://seismicssystems.net/downloads/2005_Cantieni_Biro_Modal_Parameter_Identification_and_Vibration_Monitoring_Mainau.pdf (accessed 29 March 2016) 5. Russov V. A. Diagnostika defektov vraschayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam / V. A. Rusov. – Perm, 2012. – 252 с. 6. Materialovedenie. Tehnologiya konstruksionnykh materialov : ucheb. posobie / pod red. V. P. Gorelova. – Novosibirsk : NGAVT, 2010. – 360 с. 7. Spravochnik po spetsialnyim funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami / Pod red. M. Abramovitsa, I. Stigan. – M.: Nauka, 1979. – 832 с. 8. Koshlyakov N. S., Gliner E. B., Smirnov M. M. Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki. Moscow: Vysshaya shkola, 1970. 710 p. 9. Kamke E. Spravochnik po obyiknovennyim differentsialnyim uravneniyam. Moscow: Nauka, 1976. 576 p.

Vibration_Monitoring_Mainau.pdf (accessed 29 March 2016) 5. Russov V. A. Diagnostika defektov vraschayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam / V. A. Rusov. – Perm, 2012. – 252 с. 6. Materialovedenie. Tehnologiya konstruksionnykh materialov : ucheb. posobie / pod red. V. P. Gorelova. – Novosibirsk : NGAVT, 2010. – 360 с. 7. Spravochnik po spetsialnyim funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami / Pod red. M. Abramovitsa, I. Stigan. – M.: Nauka, 1979. – 832 с. 8. Koshlyakov N. S. Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki / N. S. Koshlyakov, E. B. Gliner, M. M. Smirnov. – M.: Vysshaya shkola, 1970. – 710 с. 9. Kamke E. Spravochnik po obyiknovennyim differentsialnyim uravneniyam / E. Kamke. – M.: Nauka, 1976. – 576 с.

Bibliography (transliterated): 1. Maslov M. Y. Chislennyj analiz jelektromagnitnoj obstanovki v ofisnom pomeshhenii. M. Y. Maslov. Herald SONIIR 2004. No 1. p. 162-168. 2. Antipova S.E, Romanov V.A., Metody prognozirovaniya jelektromagnitnoj obstanovki na rabochih mestah predpriyatij jelektrojenergetiki i svyazi. Radiotekhnika. 2001. No 9. pp. 81–85. 3. Pilinsky V. V., Osobennosti obespecheniya jelektromagnitnoj sovmestimosti sovremennogo kinokonzertnogo kompleksa. Chast' 2 – Formirovanie jelektromagnitnoj obstanovki silovymi cepjami kinokonzertnogo oborudovaniya. V. V. Pilinsky, M. V. Rodionova, A. S. Chupakhin. Tehnicheskaja jelektrodinamika. Tematicheskij vypusk «Silovaja jelektronika i jenergojeffektivnost'». Vol. 4. pp. 3-9, 2009. 4. R. Cantieni, T. Biro Office floor vibrations: modal parameter identification and vibration monitoring Available at: http://seismicssystems.net/downloads/2005_Cantieni_Biro_Modal_Parameter_Identification_and_Vibration_Monitoring_Mainau.pdf (accessed 29 March 2016) 5. Russov V. A. Diagnostika defektov vraschayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnyim signalam. V. A. Rusov. Perm, 2012. 252 p. 6. Materialovedenie. Tehnologiya konstruksionnykh materialov : ucheb. posobie. pod red. V. P. Gorelova. Novosibirsk : NGAVT, 2010. 360 p. 7. Spravochnik po spetsialnyim funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami. Pod red. M. Abramovitsa i I. Stigan. M.: Nauka, 1979. 832 p. 8. Koshlyakov N. S., Gliner E. B., Smirnov M. M. Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki. Moscow: Vysshaya shkola, 1970. 710 p. 9. Kamke E. Spravochnik po obyiknovennyim differentsialnyim uravneniyam. Moscow: Nauka, 1976. 576 p.

Поступила (received) 30.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Петрищев Олег Николаевич – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»; тел.: (066) 766-31-33; e-mail: petrishev@ukr.net.

Petrishev Oleg Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "KPI", Kiev, tel.: (066) 766-31-33; e-mail: petrishev@ukr.net.

Пилинський Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»; тел.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net.

Pilinsky Vladimir Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "KPI", tel.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net.

Чупахин Александр Сергеевич – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; тел.: (050) 698-67-77; e-mail: chupe@ukr.net.

Chupakhin Alexander Sergeevich – Postgraduate, National Technical University of Ukraine "KPI", tel.: (050) 698-67-77; e-mail: chupe@ukr.net.

УДК 539.3

*И.А. ПОТАПЧУК, А.В. БАГРЯНЦЕВА***МЕТОД МАРШРУТИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНОЙ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СЕТИ НА ОСНОВЕ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

Разработаны и исследованы модель и метод применения нечеткой логики для решения задач маршрутизации в БСС-сетях. Предложен модифицированный метод маршрутизации для БСС-сети, базирующийся на аппарате нечеткой логики. Разработана общая структура контроллера нечеткой логики, определены входные и выходные параметры. Проведен сравнительный анализ предложенного метода с классическим AODV.

Ключевые слова: беспроводные сети, маршрутизация, нечеткая логика, нечеткий контроллер, нечеткие данные о состоянии радиосети, QoS, FAODV.

Актуальность темы. В последнее время развитие беспроводных сетевых технологий идет в направлениях: увеличения скорости передачи данных, повышения степени мобильности пользователей, расширения количества предоставляемых услуг, улучшения степени использования радиочастотного спектра и степени интеллектуальности сетевого и абонентского оборудования. В этих условиях начал проявляться ряд противоречий в области беспроводных сетевых технологий, наиболее острыми из которых являются:

– противоречие между увеличивающимся спросом на услуги беспроводных сетей связи (на рабочие частоты) и природными ограничениями частотных ресурсов,

– противоречие между расширением спектра предоставляемых беспроводными сетями услуг, увеличением требований к их качеству и использованием традиционных (устаревших) технологий управления.

Одним из эффективных методов разрешения перечисленных противоречий является применение в беспроводных телекоммуникационных системах элементов искусственного интеллекта, а, в свою очередь, одним из современных подходов к реализации данных элементов является применение нечеткой логики [1] и нечетких процессоров.

Отличительная черта беспроводных самоорганизующихся сетей [2] (БСС) – отсутствие фиксированной структуры и централизованного управления. Поэтому каждый узел в такой сети должен самостоятельно определять наилучший маршрут для передачи данных другим узлам. Алгоритмы, разработанные специально для решения этой задачи, получили название алгоритмов маршрутизации [3].

В отличие от классических проводных сетей [4], где топология изменяется очень редко, маршрутизация в мобильных сетях сопряжена со значительными трудностями. С одной стороны, маршрутизация является основой функционирования всей сети и должна работать максимально надежно. С другой, неустойчивая природа БСС-сетей не дает возможности применять «проверенные» способы поддержки маршрутной информации, сводя их эффективность к нулю.

Единого метода маршрутизации, удовлетворяющего требования QoS и обеспечивающего оптимизацию всех показателей эффективности функционирования сети при различных условиях ее работы, не существует. В связи с этим возникает задача разработки

и исследования новых подходов к решению задачи маршрутизации в БСС-сетях.

Таким образом, **целью данной работы** является разработка эффективного метода маршрутизации в БСС-сетях с применением элементов нечеткой логики.

Для решения задачи маршрутизации рассматривается реактивный протокол FAODV (FuzzyAd-hocOn-demandDistanceVector – нечеткая одноранговая дистанционно-векторная маршрутизация по требованию). Реактивный протокол маршрутизации был выбран по причине его лучшей масштабируемости в больших самоорганизующихся сетях. FAODV строит маршруты, используя цикл «запрос-ответ». Реактивные протоколы не требуют периодических обновлений таблиц маршрутизации, сохраняя пропускную способность беспроводной среды и экономя запас энергии батарей мобильных терминалов. Такие протоколы не требуют никаких излишних затрат при возникновении изменений в топологии мобильной сети, а особенно, если возникает незначительное движение узлов. Именно протоколы по запросу способны динамически определять пути передачи с достаточной полосой пропускания и требуемой задержкой, несмотря на частые изменения топологии сети и выполнять необходимые сервисные требования [5].

Основным недостатком работы такого протокола является внесение задержки [6,7] между моментом прихода запроса установить соединение от приложения и моментом установления соединения из-за реактивной природы протокола. Этот недостаток в предложенном протоколе частично компенсируется механизмом кэширования, который является настраиваемым в зависимости от условий работы сети.

Алгоритм работы протокола состоит в следующем (события и соответствующие им процедуры обработки):

- Запрос установления соединения. Если маршрут до требуемого узла назначения не был найден в кэше, то узел формирует пакет RouteRequest (запрос маршрута), где указывает требуемый адрес назначения и свой адрес, рассылает этот пакет широкоэмитивно и устанавливает таймер ожидания ответов. Сессия передачи данных переводится в режим ожидания.
- Получение пакета RouteRequest. Узлы, получая пакет RouteRequest, проверяют, не являются ли

они тем узлом, с которым запрашивающий узел хочет установить соединение. Если нет, то этот узел добавляет себя в список промежуточных узлов, через которые прошел пакет, и рассылает пакет дальше широко-вещательно. Кроме того, узел записывает в пакет некоторые показатели своего состояния, которые потребуются в конечной стадии для выбора оптимального маршрута (эти показатели подробно рассмотрены ниже в данной главе). В противном случае пакет достиг узла назначения, и данный узел отправляет ответ RouteReply по маршруту, записанному в пришедшем пакете RouteRequest.

- Получение пакета RouteReply. Как было сказано выше, после отправки запроса поиска маршрута узел устанавливает таймер ожидания ответов, во время работы которого он собирает пакеты RouteReply с найденными маршрутами. Если же пакет RouteReply приходит после срабатывания этого таймера, то он отбрасывается.

- Срабатывание таймера ожидания ответов RouteReply. Когда приходит запрос установления соединения, узел отправляет RouteRequest и устанавливает таймер ожидания ответов. В течение этого периода узел собирает полученные пакеты RouteReply с различными маршрутами к узлу назначения во временную таблицу. Пакеты с описанием потенциальных маршрутов, пришедшие после истечения таймера ожидания, не учитываются. При срабатывании таймера собранные маршруты передаются в блок принятия решения, который и определяет, какой из маршрутов оптимален для передачи пакета с требуемым QoS.

После выбора оптимального маршрута узел записывает этот маршрут в таблицу маршрутизации на определенный период времени (кэширует маршрут). Если приходит новый запрос соединения, и адрес назначения содержится в таблице, новый запрос RouteRequest не формируется, а данные отправляются по ранее сохраненному маршруту, как было сказано выше. Кроме того, для обеспечения устойчивости к сбоям узлов на выбранном маршруте создается резервная таблица маршрутизации. Так как протокол маршрутизации обнаруживает множество маршрутов до узла назначения, то из данного множества выбирается один оптимальный маршрут, как было показано выше, плюс два запасных. Запасные маршруты выбираются по следующему алгоритму:

- Результаты оценки маршрута проходят через блок принятия решения, где вычисляется их рейтинг. Все маршруты записываются с соответствующими им рейтингами во временную таблицу.

- Затем выполняется проход по всем строкам таблицы и отмечаются маршруты, множество промежуточных узлов которых не пересекается с множеством промежуточных узлов выбранного оптимального маршрута. Таким образом, мы находим множество непересекающихся маршрутов. Это важно, поскольку снижается вероятность того, что давший сбой на оптимальном маршруте узел повлияет на работу двух запасных маршрутов.

- Из множества отмеченных маршрутов выбирается два маршрута с наибольшим рейтингом, кото-

рые и становятся запасными.

- Если множество отмеченных маршрутов пусто, повторяем процедуру выбора запасных маршрутов, но отмечаем те маршруты, которые пересекаются с выбранным в одном узле.

- Получение пакета данных. При получении пакета данных узел просто извлекает из него адрес следующего узла по маршруту передачи этого пакета и передает его данному узлу.

- Срабатывание таймера сброса кэша. При срабатывании этого таймера соответствующая запись удаляется из таблицы маршрутизации. Таким образом, данный протокол позволяет обнаруживать подмножество всех возможных маршрутов до узла назначения, передавать данные о состоянии узлов и каналов связи в контрольных сообщениях, а также кэшировать выбранные маршруты для повторного использования позднее. Кроме того, он обеспечивает устойчивость к сбоям на маршруте передачи данных за счет выбора двух резервных маршрутов, не имеющих пересечения с основным.

Модель сети с нечеткими данными о состоянии радиoliniий. Учет большего количества параметров состояния узлов и каналов связи позволяет лучше оценить картину распределения трафика в сети и выбирать более подходящий маршрут. Для предлагаемого метода маршрутизации были выбраны следующие параметры: пропускная способность канала, джиттер, задержка передачи, загруженность (размер свободной очереди) и число «скачков» (количество узлов).

Сеть представляется ненаправленным графом $G = (V, E)$, где V – множество узлов; E – множество каналов. Каждый канал $(i, i+1) \in E$ и узел $V_i \in V$ могут характеризоваться положительной метрикой $c_\eta(i, i+1), c_\eta(v_i) \in Z^+$.

Например, значениями c_η могут быть:

- для канала: пропускная способность $B(e) \in Z^+$, задержка передачи $d(e) \in Z^+$ и джиттер $\Delta d(e) \in Z^+$;

- для узла: количество узлов $q \in Z^+$, загруженность пакетного буфера $l(v) \in Z^+$.

Обозначим циклический маршрут p в G как последовательность узлов $(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)$ таких, что $i, 1 < i < n, (v_i, v_{i+1}) \in E$. Определим параметры состояния узлов и каналов связи для каждого p (маршрута): пропускная способность $B(p)$, задержка распространения $d(p)$, джиттер задержки $\Delta d(p)$, количество узлов $N(p)$ и загруженность пакетного буфера для всего маршрута $\bar{l}(p)$. Далее приведено краткое описание каждого из них:

- Пропускная способность канала связи является минимумом пропускной способности среди всех каналов на маршруте:

$$B(p) = \min_{i \in p} \{B(v_i, v_{i+1})\}. \quad (1)$$

- Задержка передачи пакета. Задержка в данном случае означает период времени, проходящий от момента отправки кадра уровня MAC до момента прихо-

да подтверждения о его получении от другого узла. Задержка передачи пакета зависит от множества факторов, но ее значение мы будем определять как значение задержки для последней произведенной передачи. Значения задержки для всех промежуточных каналов связи суммируются:

$$d(p) = \sum_{i=1}^{n-1} d(v_i, v_{i+1}). \quad (2)$$

• Джиттером всего маршрута считается максимум джиттера среди всех каналов на маршруте:

$$\Delta d(p) = \max_{i \in p} \{B(v_i, v_{i+1})\}. \quad (3)$$

• Загруженность пакетного буфера узла составляет:

$$l_i = N_i / B_i. \quad (4)$$

Суммарная загруженность буферов на маршруте выражается как:

$$L = \sum_{i=1}^n l_i. \quad (5)$$

Весовой коэффициент для загруженности каждого узла в отдельности в составе суммарной загруженности:

$$\lambda_i = l_i / L, \text{ при условии } L \neq 0. \quad (6)$$

Относительная загруженность пакетных буферов узлов на маршруте вычисляется как:

$$\bar{l} = \sum_{i=1}^n l_i \cdot \lambda_i. \quad (7)$$

Предлагаемая оценочная функция позволяет учитывать относительную загруженность пакетного буфера каждого из узлов на маршруте. Например, пусть маршрут состоит из четырех узлов, и оценка загруженности маршрута даст следующее (табл. 1):

Таблица 1 – Оценка загруженности маршрута

	У1	У2	У3	У4	
l_i	0,9	0,2	0,1	0,1	$L = 1,3$
λ_i	0,69	0,15	0,08	0,08	
$l_i \cdot \lambda_i$	0,621	0,03	0,008	0,008	$\bar{l} = 0,668$

Для сравнения, среднее значение загруженности пакетных буферов дало бы значение $\frac{0,9+0,2+0,1+0,1}{4} = 0,325$. Предлагаемая же оценочная

функция отражает тот факт, что пакетный буфер одного из узлов практически полный. Таким образом, каждый из промежуточных узлов при получении пакета запрос маршрутизации RouteRequest вычисляет значение l_i , и записывает его вместе со своим адресом в пакете. В результате в пакете RouteRequest передается два вектора: вектор адресов промежуточных узлов и вектор значений l_i промежуточных узлов. Когда узел-источник запроса RouteRequest получает ответ RouteReply, он извлекает все значения l_i , для всех промежуточных узлов и вычисляет значение \bar{l} для оценки загруженности маршрута.

• Количество промежуточных узлов. При прочих равных условиях более короткие маршруты могут оказаться предпочтительнее, поскольку передача через меньшее количество узлов оказывает меньшее влияние на текущую картину передачи радиосигналов между узлами сети. Список всех промежуточных узлов до узла назначения содержится в ответе маршрутизации.

В результате, после получения узлом-источником

ответа маршрутизации, значения перечисленных параметров извлекаются из пакета и подаются на вход контроллера нечеткой логики, принимающего решения о выборе маршрута.

Применение аппарата нечеткой логики для решения задач маршрутизации. В качестве блока принятия решения о выборе оптимального маршрута и двух запасных маршрутов предлагается использовать контроллер нечеткой логики. Одним из основных преимуществ контроллера нечеткой логики является то, что он позволяет учитывать множество параметров для принятия решения, не требуя сложных математических вычислений.

В [8] нечеткая логика используется для много-маршрутной маршрутизации пакетов различного приоритета в БСС-сетях. Для обнаружения возможных маршрутов использовался реактивный протокол маршрутизации DSR, затем контроллер на основе нечеткой логики принимал решение, посылать ли пакет по одному маршруту, по нескольким маршрутам одновременно или вовсе отбросить пакет. Контроллер строил свое решение на основе лишь двух параметров: загруженности буферов промежуточных узлов обнаруженных маршрутов и приоритета пакета.

Правила применения нечеткой логики для решения задачи маршрутизации выглядят следующим образом: «Если буферы узлов на маршруте загружены СИЛЬНО и приоритет пакета НИЗКИЙ, то ОТБРОСИТЬ пакет». Нечеткая логика позволяет в простой форме без построения точной математической модели учитывать множество параметров при управлении процессом маршрутизации и превосходит по некоторым параметрам традиционные протоколы маршрутизации.

Предлагаемый метод маршрутизации в БСС-сетях включает три этапа:

1) Запуск процедуры обнаружения возможных маршрутов до узла назначения, при этом контрольные пакеты маршрутизации также передают параметры состояния узлов и каналов связи.

2) Вычисление рейтингов обнаруженных маршрутов. Значения параметров состояния каждого маршрута подаются на вход контроллера нечеткой логики, который проводит фазификацию всех значений и затем в соответствии с установленной базой правил выполняет операцию нечеткого вывода. На выходе контроллера получается четкий (численный) рейтинг каждого маршрута. Маршрут с наибольшим рейтингом считается оптимальным.

3) Из множества остальных обнаруженных маршрутов происходит выбор еще двух маршрутов с наибольшими рейтингами, которые и становятся запасными.

В результате работы предлагаемого алгоритма, на этапе установления соединения по запросу формируется несколько (в рассматриваемом случае три: один основной и два резервных) маршрутов. В процессе ведения информационного обмена осуществляется динамическая оценка рабочего маршрута. В случае снижения характеристик основного маршрута ниже порогового значения (определяемого приложением) из-за повышенной мобильности узлов или из-за

плохих погодних умов, или если узел или часть узлов покинет маршрут, уточняются характеристики двух оставшихся (запасных) маршрутов и выбирается лучший из них.

Если среди оставшихся (запасных) маршрутов не находится подходящего по качеству, производится повторное восстановление соединения.

Разработка блока принятия решения (контроллера) и результаты моделирования. С каждым входным параметром нечеткого контроллера сопоставляется лингвистическая переменная, имеющая пять термов:

- 1) пропускная способность – «очень низкая», «низкая», «средняя», «большая», «очень большая»;
- 2) задержка передачи пакета – «очень низкая», «низкая», «средняя», «большая», «очень большая»;
- 3) джиттер – «очень малый», «малый», «средний», «высокий», «очень высокий»;
- 4) загруженность пакетных буферов – «очень малая», «малая», «средняя», «высокая», «очень высокая»;
- 5) количество промежуточных узлов – «очень малое», «малое», «среднее», «большое», «очень большое».

В качестве функций принадлежности для каждого терма всех лингвистических переменных выбраны треугольные функции принадлежности, поскольку, как показывает практика и исследования [9], они хорошо подходят для использования при решении подобных проблем.

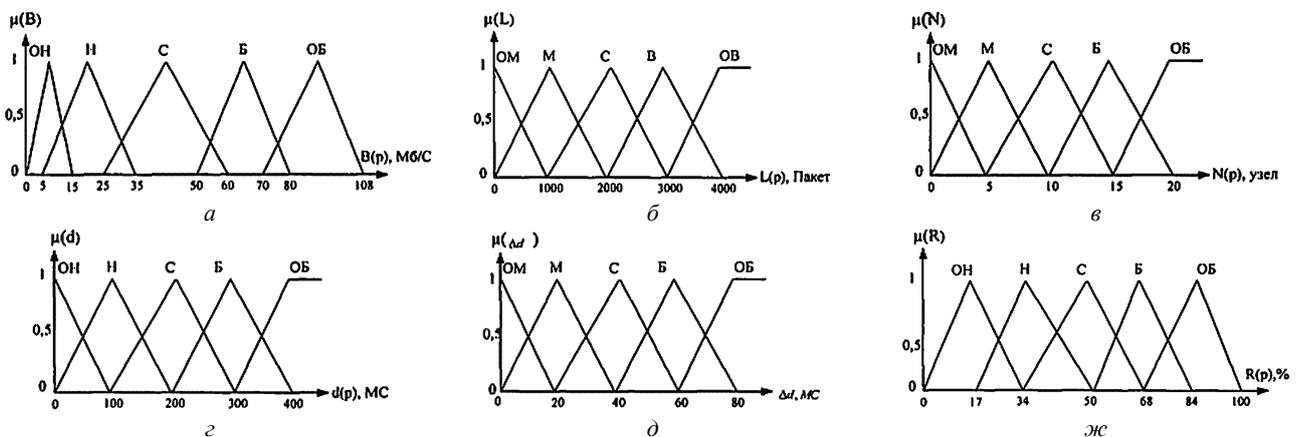


Рисунок 2 – Функции принадлежности лингвистических переменных: а – пропускная способность; б – загруженность пакетных буферов; в – количество скачков; г – задержка пакета; д – джиттер; ж – рейтинг маршрута

Выводом каждого правила импликации [10] является лингвистическая переменная «рейтинг маршрута» $R(p)$, множество значений которой также состоит из пяти термов от «очень низкий» до «очень большой».

Логика работы нечеткого контроллера состоит в следующем: для каждого обнаруженного маршрута вычисляется его точный рейтинг в соответствии с базой правил.

База правил нечеткого вывода состоит из правил следующего вида: «если загруженность пакетных буферов ВЫСОКАЯ и доступная пропускная способность НИЗКАЯ и задержка передачи пакета ВЫСОКАЯ и джиттер СРЕДНИЙ и количество промежуточных узлов БОЛЬШОЕ, то рейтинг маршрута

Функция принадлежности треугольного вида определяется как:

$$f(x, a, w) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq a - w; \\ \frac{x - (a - w)}{w}, & \text{если } (a - w) \leq x \leq a; \\ \frac{(a + w) - x}{w}, & \text{если } a \leq x \leq (a + w); \\ 0, & \text{если } x \geq a + w. \end{cases} \quad (8)$$

где a является точкой, где значение функции принадлежности равно 1, w – половина ширины основания треугольника функции принадлежности, $\mu(x)$ – собственно значение самой функции (рис. 1).

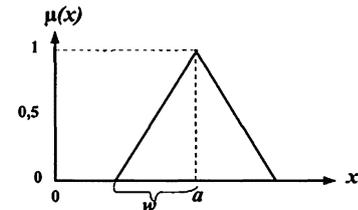


Рисунок 1 – Функция принадлежности треугольного вида

Функции принадлежности показаны на рис. 2 (условные обозначения лингвистических переменных на рис. 2: ОН – «очень низкая», Н – «низкая», С – «средняя», Б – «большая», ОБ – «очень большая», ОМ – «очень малая», ОБ – «очень высокая»).

ОЧЕНЬ НИЗКИЙ».

Количество правил нечеткого вывода в базе правил $5^5 = 3125$, поскольку каждая из пяти лингвистических переменных может принимать пять различных значений (полная база правил не приведена здесь из-за ее большого размера). На основе разработанных правил вычисляются значения соответствующей четкой переменной (в нашем случае рейтинг маршрута), которые и управляют выбором оптимального маршрута.

На выходе нечеткого контроллера находим точный рейтинг маршрута, который получается в результате дефазификации выходного нечеткого решения. В качестве T-нормы будем использовать операцию минимума (min), в качестве S-нормы – операцию максимума (max):

$$\mu_A(x)^{-T} \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad (9)$$

$$\mu_A(x)^{-S} \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (10)$$

Правило нечеткой импликации задается правилом Мамдани:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cap \mu_B(y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)), \quad (11)$$

где A и B – нечеткие множества $A \subseteq X$, $B \subseteq Y$, отношение R определено на $X \times Y$.

На выходе блока выработки решения получаем один нечеткий вывод $\bar{B}^k \subseteq Y$ (рейтинг маршрута). Нечеткий вывод определяется следующим.

Условие:

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) - \text{это } A', \quad (12)$$

где $A' = (A'_1 * A'_2 * A'_3 * A'_4 * A'_5)$.

Импликация:

$$U_{k=1}^N R^{(k)}, R^{(k)} : A^{(k)} \rightarrow B^{(k)}. \quad (13)$$

Вывод:

$$y - \text{это } B',$$

где $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5$ – соответственно входные переменные, $R^{(k)}, k = 1, \dots, N$ – правила нечеткого вывода, B' – выходное нечеткое множество, определяющее рейтинг маршрута.

Таким образом, выходной рейтинг маршрута вычисляется как:

$$B' = A' \circ U_{k=1}^N R^{(k)}. \quad (14)$$

Так как правило нечеткой импликации мы определили T-нормой типа min, то выполняется:

$$B' = A' \circ U_{k=1}^N R^{(k)} = U_{k=1}^N R^{(k)} \circ A'. \quad (15)$$

Следовательно, функция принадлежности нечеткого множества B' равна:

$$\mu_{B'}(y) = \max_{k=1, \dots, N} \mu_{B^k}(y), \quad (16)$$

где функция принадлежности $\mu_{B^k}(y)$ задается выражением:

$$\mu_{B^k}(y) = \mu_{A^k \rightarrow B^k}(\bar{x}, y), \quad (17)$$

Таким образом, на вход нечеткого контроллера подается $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5)$. Исходя из (17), получаем:

$$\mu_{B^k}(y) = \mu_{A^k \rightarrow B^k}(\bar{x}, y) =$$

$$\mu_{(A_1^k * A_2^k * A_3^k * A_4^k * A_5^k) \rightarrow B^k}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5, y). \quad (18)$$

Так как в качестве нечеткой импликации используется правило минимума, а декартово произведение нечетких множеств задается также операцией минимум, получаем:

$$\begin{aligned} \mu_{B^k}(y) &= \min \left[\mu_{(A_1^k * A_2^k * A_3^k * A_4^k * A_5^k) \rightarrow B^k}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5), \mu_{B^k}^k(y) \right] = \\ &= \min \left[\mu_{A_1^k}(\bar{x}_1), \mu_{A_2^k}(\bar{x}_2), \mu_{A_3^k}(\bar{x}_3), \mu_{A_4^k}(\bar{x}_4), \mu_{A_5^k}(\bar{x}_5), \mu_{B^k}^k(y) \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

В результате, используя выражение (16), получаем:

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \max_{k=1, \dots, N} \left\{ \min \left[\mu_{A_1^k}(\bar{x}_1), \mu_{A_2^k}(\bar{x}_2), \mu_{A_3^k}(\bar{x}_3), \right. \right. \\ &\left. \left. \mu_{A_4^k}(\bar{x}_4), \mu_{A_5^k}(\bar{x}_5), \mu_{B^k}^k(y) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (20)$$

Дефазификацию выходного значения контроллера (точный рейтинг маршрута) будем производить

по методу центра тяжести. Поскольку используются функции принадлежности треугольного вида, то:

$$R' = \frac{\int_R r u_R(r) d(r)}{\int_R u_R(r) d(r)} \quad (21)$$

где $\mu_R(r)$ – функция принадлежности правила выходного нечеткого множества. Ранее было установлено, что функции принадлежности входных и выходных переменных являются симметричными треугольными функциями принадлежности, описываемыми правилами нечеткого вывода (8).

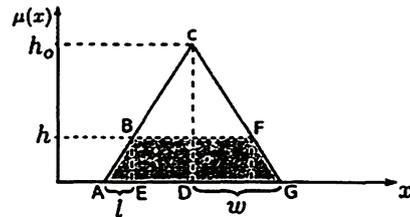


Рисунок 3 – Вычисление площади фигуры, образованной выходным нечетким множеством

Площадь закрашенной трапеции на рис. 3 вычисляется по формуле:

$$S = \frac{1}{2} (AG + BF)h = \frac{1}{2} (2w + (2w - 2l))h. \quad (22)$$

Для вычисления l используем тот факт, что треугольники $\triangle ABE$ и $\triangle ACD$ подобны (по двум углам).

Следовательно, $\frac{CD}{BE} = \frac{AD}{AE}$ то есть $\frac{h_0}{h} = \frac{w}{l}$, откуда

$$l = \frac{w * h}{h_0}. \quad (23)$$

Таким образом, площадь фигуры внутри треугольника с вершучкой, «отрезанной» на высоте h (как на рис. 3), вычисляется по формуле:

$$S = \frac{1}{2} (2w + (2w - 2l))h = 2wh \left(1 - \frac{h}{2h_0}\right), \quad (24)$$

где $h_0 = 1$ (максимальное значение функции принадлежности). Поэтому вычисление точного рейтинга маршрута производится достаточно просто.

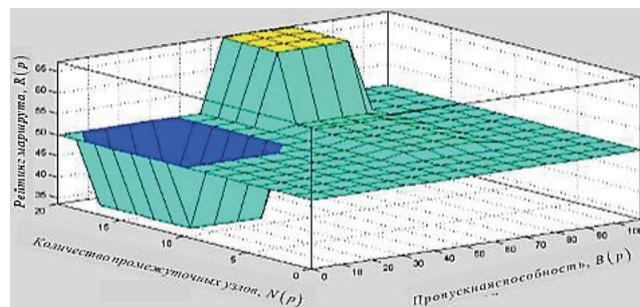


Рисунок 4 – Зависимость рейтинга маршрута $R(p)$ от входных переменных нечеткой системы – пропускной способности $B(p)$ и числа узлов $N(p)$

Для более наглядного отображения работы нечеткого контроллера в соответствии с этим методом был построен график (рис. 4), отображающий зависимости выходной переменной от входных. По осям откладываются входные переменные $B(p)$, $d(p)$, $\Delta d(p)$, $N(p)$ и $l(p)$, а по вертикальной оси – соответствующие

значение $R(p)$. Полученный график представляет собой дефазифицированную поверхность нечеткого рейтинга маршрута.

Для получения графического отображения этой функции, была построена визуальная модель (рис. 5) в пакете MatLab. Из-за большого размера базы правил (3125) были приведены только 25 правил.

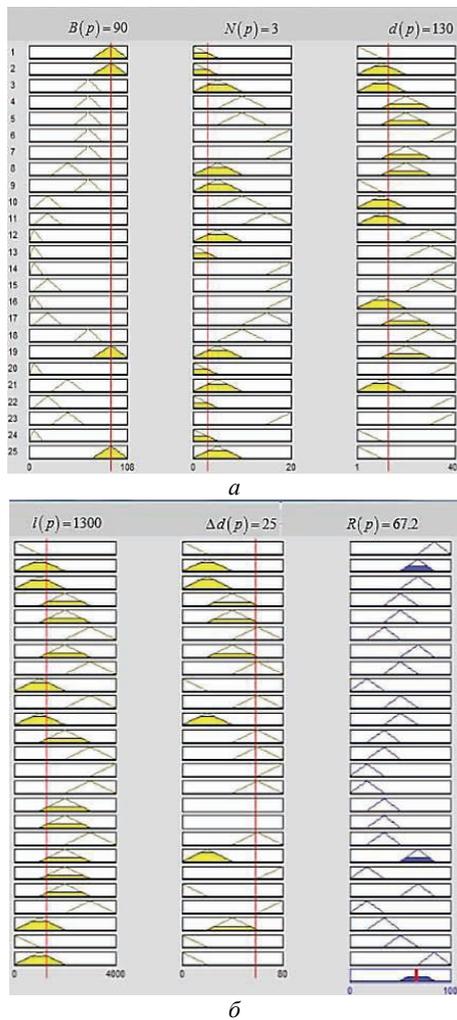


Рисунок 5 – Визуализация правил нечеткого вывода: $B(p)$ – пропускная способность, $N(p)$ – число узлов, $d(p)$ – задержка распространения, $l(p)$ – пакетная загруженность буфера, $\Delta d(p)$ – джиттер задержки, $R(p)$ – рейтинга маршрута

Таблица 2 – Параметры маршрутов в сети

Маршрут	$B(p)$	$d(p)$	$\Delta d(p)$	$N(p)$	$\bar{l}(p)$
A–D–G–J	90	130	25	3	1300
A–B–E–K–J	68	200	40	5	2200
A–C–F–I–J	70	100	35	4	3300

Рассмотрим пример, когда сеть состоит из 10 узлов, расположенных на участке площадью 700x700 кв.м. Предложим что станция А ищет оптимальный маршрут для передачи пакетов данных станции J. Таким образом, протокол маршрутизации по требованию запускает процедуру обнаружения возможных маршрутов до узла J, при этом контрольные пакеты маршрутизации также передают параметры состояния

узлов и каналов связи. В результате найдены три возможных маршрута «A–D–G–J», «A–B–E–K–J», «A–C–F–I–J», и их параметры как показаны в табл. 2.

Получая ответы от станции J, станция А производит оценки пяти параметров на каждом обнаруженном маршруте.

Собрав необходимые данные, станция А осуществляет перевод параметров состояния каждого из обнаруженных маршрутов в нечеткий формат, используя функции принадлежности (рис. 2) для каждого из параметров (табл. 3).

Таблица 3 – Оценка параметров маршрутов

М-г	Л.П/Ф.П	$\mu(B)$	$\mu(d)$	$\mu(\Delta d)$	$\mu(N)$	$\mu(l)$
A–D–G–J	ОБ	0,95	0	0	0,45	0
	Б	0	0	0,85	0,55	0,65
	С	0	0,3	0,2	0	0,25
	Н	0	0,6	0	0	0
A–B–E–K–J	ОБ	0	0	0	0	0
	Б	0,85	0	0	0	0,15
	С	0	0,95	1	0	0,9
	Н	0	0	0	1	0
A–C–F–I–J	ОБ	0	0	0	0	0,4
	Б	0,6	0	0,4	0	0,6
	С	0	0	0,55	0	0
	Н	0	1	0	0,65	0
	ОН	0	0	0	0,2	0

С помощью построенной модели нечеткой логики в пакет MatLab, рейтинг каждого маршрута получается так:

$$R(p)_{A-D-G-J} = 67,2 \%, \\ R(p)_{A-B-E-K-J} = R(p)_{A-C-F-I-J} = 50 \%$$

Следовательно, при данных значениях параметров состояния канала и узлов связи, оптимальным маршрутом считается маршрут «A–D–G–J», по которому и будет осуществляться передача. В случае снижения характеристик основного маршрута ниже порогового значения, или если узел или часть узлов покинет маршрут, осуществляется уточнение характеристик двух оставшихся (запасных) маршрутов и выбирается лучший из них.

Для сравнения эффективности работы предложенного метода маршрутизации с существующими методами выбрано два критерия качества обслуживания: доля доставленных пакетов и средняя задержка передачи пакета для всей сети в целом. В качестве протокола для сравнения выбран AODV [3, 11].

Топология смоделированной сети включает 10/20 узлов, расположенных на участке площадью 700x700 кв.м. Скорость движения узлов от 0 до 10 м/с. Размер пакета данных 512 бит. Каждый источник передает как минимум 2 пакета, как максимум 4 пакета в секунду.

Результаты моделирования на рис. 6. показывают, что при количестве узлов в сети 10 доля доставленных пакетов увеличивается на 5,07 %, средняя задержка пакета на маршруте снижается на 49,517 %. При 20 узлах, доля доставленных пакетов увеличивается на 4,96 %, задержка пакета на маршруте снижается на 45,32 %.

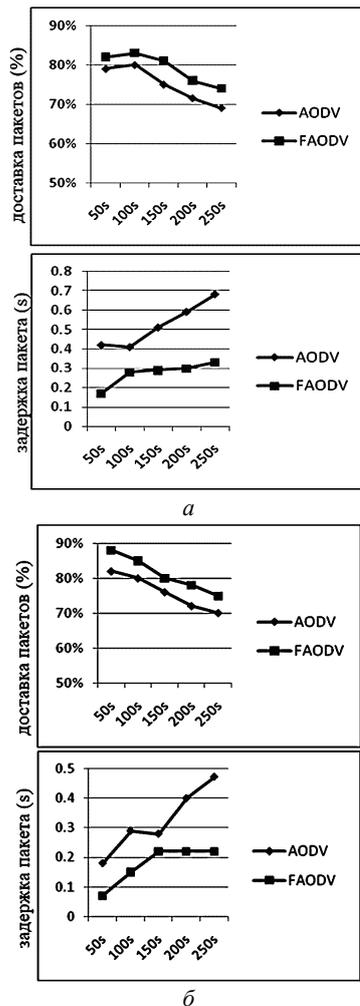


Рисунок 6 – Сравнения эффективности предлагаемого алгоритма маршрутизации с классическим AODV: а – количество узлов – 10; б – количество узлов – 20

Выводы. Предложен модифицированный метод маршрутизации для БСС-сети, базирующийся на аппарате нечеткой логики. Основными достоинствами метода являются:

- Возможность поиска множества маршрутов при поступлении запроса приложения установить сессию.
- Возможность учета одновременно 5 параметров состояния узлов и каналов связи при выборе оптимального маршрута из множества найденных.
- Возможность оптимизации разработанного протокола маршрутизации через настраиваемые параметры для заданного сценария работы сети, например, с целью повышения показателей качества обслуживания и непрерывности обслуживания абонентов.

- Повышение отказоустойчивости при сбое на маршруте передачи данных за счет двух резервных маршрутов.

Была разработана общая структура контроллера нечеткой логики, определены входные и выходные параметры. В процессе анализа различных параметров оценки маршрутов был определен набор параметров, которые могут быть использованы на практике: доступная пропускная способность, задержка передачи пакета, загруженность пакетных буферов, джиттер, количество промежуточных узлов.

Проведен сравнительный анализ предложенного метода с классическим AODV.

Список литературы: 1. Баер П. Введение в нечеткую логику и системы нечеткого управления / П. Баер, С. Новак, Р. Винклер. Режим доступа: <http://softlab.od.ua/algo/neuro/fazzv-intro/>. 2. Thomas R.W. Cognitive Networks / R.W. Thomas, L.A. DaSilva, A.B. MacKenzie // Proc. IEEE DySPAN 2005, Nov. 2005. – P. 352–360. 3. Siva Ram Murthy C. Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols / C. Siva Ram Murthy, B. S. Manoj // Prentice Hall, 2004. – 880 p. 4. Романюк В. Мобильные радиосети – перспективы беспроводных технологий // Сети телекоммуникации, декабрь 2003. – С. 62–68. 5. Жуков И. А. Обеспечение заданного уровня качества обслуживания в объединенных сетях / И.А. Жуков, И.А. Клименко // Проблемы информатизации та управління: Зб. наук.пр. – К.: НАУ, 2005. – Вип. 13. – С. 5–14. 6. Минович А.И. Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях / А.И. Минович, В.А. Романюк // Зв'язок. – 2001. – № 1. – С. 31–36. 7. Громовский А.В. Алгоритм маршрутизации EXZRP в интегрированных сетях нового поколения / А.В. Громовский // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2007. – № 6. – С. 111–118. 8. Alandjani G. Fuzzy routing in ad hoc networks / G. Alandjani, E. Johnson // Performance, Computing, and Communications Conference: Conference Proceedings of the 2003 IEEE. 9. J. Faedah, K. Sabira Adaptive Modulation for OFDM Systems. – Vol. 1, No 2. – August 2009. 10. Тэрано Т. Прикладные нечеткие системы / Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с. 11. Perkins C. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing / C. Perkins, E. Belding-Royer // Request for Comments: 3561. – 2003. – Режим доступа: <http://tools.ietf.org/html/rfc3561>.

Bibliography (transliterated): 1. P. Baer, S. Novak, R. Vinkler. Baer P. Vvedenie v nechetkuju logiku i sistemy nechetkogo upravlenija. n.d.<<http://softlab.od.ua/algo/neuro/fazzv-intro/>>. 2. R.W. Thomas, L.A. DaSilva, A.B. MacKenzie. Cognitive Networks. Proc. IEEE DySPAN, 2005. 352–360. 3. C. Siva Ram Murthy, B. S. Manoj. Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols. Prentice Hall, 2004. 880. 4. Romanjuk, V. Mobil'nye radioseti – perspektivy besprovodnyh tehnologij. Seti telekommunikacii (2003): 62–68. 5. I.A. Zhukov, I.A. Klimenko. Obespechenie zadannogo urovnja kachestva obsluzhivaniya v ob#edinennyh setjah. Problemi informatizacii ta upravlinnja 13 (2005): 5–14. 6. A.I. Minochkin, V.A. Romanjuk. Protokoly marshrutizacii v mobil'nyh radiosetjah. Zvjazok 1 (2001): 31–36. 7. A.V., Gromovskij. Algoritm marshrutizacii EXZRP v integrirovannyh setjah novogo pokolenija. Komp'juterni zasobi, merezhi ta sistemi 6 (2007): 111–118. 8. G. Alandjani, E. Johnson. Fuzzy routing in ad hoc networks. Performance, Computing, and Communications Conference. 2003. 9. J.Faegah, K.Sabira. Adaptive Modulation for OFDM Systems. 2. Vol. 1. 2009. 10. T. Tjerano, K. Asai, M. Sugeno. Prikladnye nechetkie sistemy. Moscow: Mir, 1993. 11. C. Perkins, E. Belding-Royer. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. 2003. <<http://tools.ietf.org/html/rfc3561>>.

Поступила (received) 26.02.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Потапчук Ілья Александрович – студент кафедри «Комп'ютерних та інформаційних технологій» НТУ «ХПІ», тел. (063) 4349001, e-mail: potapchuk.ilya@gmail.com

Potapchuk Illia Aleksandrovych – student of "Computer and informational technologies" department of NTU "KhPI", cell. (063) 434 90 01, e-mail: potapchuk.ilya@gmail.com

Багрянцева Александра Вячеславовна – студент кафедри «Комп'ютерних та інформаційних технологій» НТУ «ХПІ», тел. (093) 973 25 73, e-mail: bagryantseva.sasha@gmail.com

Bagryantseva Aleksandra Vyacheslavovna – student of "Computer and informational technologies" department of NTU "KhPI", cell. (093) 9732573, e-mail: bagryantseva.sasha@gmail.com

УДК 621.372

А.Ф. РОЗВАДОВСКИЙ, В.С. ЛАЗЕБНИЙ, В.В. ПИЛИНСКИЙ**ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭМС ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ В ЛЭП**

Рассмотрена схема организации комбинированной (гибридной – проводно-беспроводной) передачи данных по проводам линий электропередачи (ЛЭП) с учетом возникающих при этом интерференционных помех. Для снижения уровня этих помех с целью обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) предложено дополнить системы передачи информации в силовых цепях (Power Line Communication – PLC) дополнительными заграждающими фильтрами на основе параллельного колебательного контура. Выполнено моделирование амплитудно-частотных характеристик данных фильтров с учетом паразитных параметров компонентов в схемах замещения и предложены рекомендации по их применению.

Ключевые слова: PLC, беспроводная передача, интерференция, помехоподавляющие фильтры, моделирование, ЭМС.

Введение. Эффективная работа современных энергосистем требует регулярный обмен информацией между энергетическими объектами, удаленными один от другого на большие расстояния. Информация содержит как телеметрические данные, так и сведения служебного характера для диспетчерских пунктов а также для подвижных ремонтных бригад. Для передачи такой информации необходима разветвленная сеть каналов связи, в качестве которых, в частности, используются непосредственно линии электропередачи (ЛЭП) [1].

Технология передачи данных по линиям электропитания (Power Line Communication – PLC), получив вначале распространение в энергетике для передачи телеметрических данных по линиям электропитания [2, 3], нашла дальнейшее применение в системах контроля и управления удаленными объектами [4], автоматизированных системах коммерческого учета электроэнергии [5], локальных вычислительных сетях [6, 7], в технологии «последней мили» для доступа к широкополосному Интернету [8] и др.

Действенной и эффективной областью применения PLC технологии остается передача данных по проводам ЛЭП. В настоящее время все большее распространение получают конвергентные системы передачи данных по ЛЭП, включающие помимо самих электрических проводов радиоканал, оптические каналы связи и др. [9, 10].

С учетом того, что электрические провода ЛЭП изначально не были предназначены для передачи высокочастотной информации, актуальной остается задача обеспечения их электромагнитной совместимости (ЭМС) с другими устройствами. С этой целью разработаны и приняты стандарты, устанавливающие для них нормы и методы измерений помехоэмиссии [11, 12, 13].

Несмотря на достигнутые успехи и имеющиеся наработки в данной области, появление новых комбинированных решений, приводит к возникновению новых задач по обеспечению ЭМС как внутри таких систем, так и с другими устройствами.

Целью статьи является поиск технических решений, позволяющих снизить интерференционные помехи внутри проводно-беспроводной (гибридной) системы передачи данных вследствие интерференции служебных сигналов энергетических служб и сигналов системы PLC от антенн приемопередатчиков и

проводов ЛЭП с целью обеспечения их электромагнитной совместимости.

Основная часть. Одной из основных задач при построении PLC систем для передачи данных по ЛЭП является обеспечение необходимой дальности передачи. Для этого, в частности, используются решения, с применением беспроводных приемопередатчиков. В качестве примера реализации такой системы для трехпроводной ЛЭП приведена схема на рис. 1 [10].

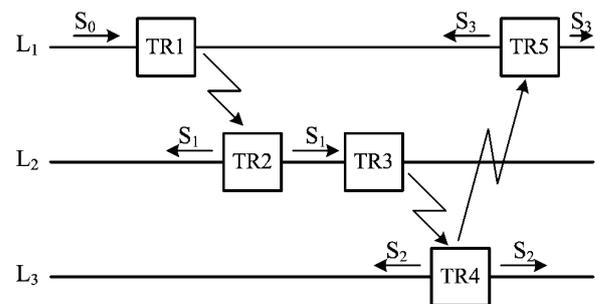


Рисунок 1 – Схема проводно-беспроводной PLC системы

Предполагается, что каждый из приемопередатчиков TR1, TR2, ..., TR5 имеет встроенные антенны (одну или две), использующиеся на передачу и на прием. А для уменьшения интерференции высокочастотного сигнала в проводах ЛЭП L1, L2, L3 в этих же приемопередатчиках осуществляется преобразование частоты (сигналы S_0 , S_1 , S_2 , S_3 передаются на различных несущих).

Параметры помехоэмиссии проводов ЛЭП определяются условиями распространения вдоль них электромагнитных волн. Данная задача подробно рассмотрена в работе [14].

При этом следует учитывать, что собственно провода ЛЭП также можно трактовать как приемопередающие антенны. И в данном случае провода ЛЭП L1, L2, L3 необходимо рассматривать как одиночные проводники с токами [15].

Передача информации по линиям электропередачи обычно реализована в диапазоне высоких частот с нижней границей 18 кГц (для распределительных сетей 6-35 кВ) и 36 кГц (для сетей 110 кВ и выше). Верхняя граница ВЧ диапазона принята равной 600 кГц для всех классов электросетей [16].

С учетом того, что длина излучающего провода ЛЭП обычно значительно больше длины волны пере-

даваемого сигнала, то предполагаем, что электромагнитная волна распространяется вдоль бесконечно длинного проводника и ее отраженной компонентой можно пренебречь. В этом случае напряженность поля излучения равна [15]:

$$E_{\theta} = -j60I_0 \sin \theta \frac{\sin \left[\frac{kL}{2}(1 - \cos \theta) \right]}{1 - \cos \theta} \frac{\exp(jkR - j\omega t)}{R}, \quad (1)$$

где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; I_0 – амплитуда тока; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; L – длина излучающего провода; θ – угол, отсчитываемый от оси излучающего провода; R – расстояние до точки наблюдения; ω – круговая частота сигнала.

На рис. 2 приведены нормированные диаграммы направленности по характеристике направленности, как фрагмента из (1).

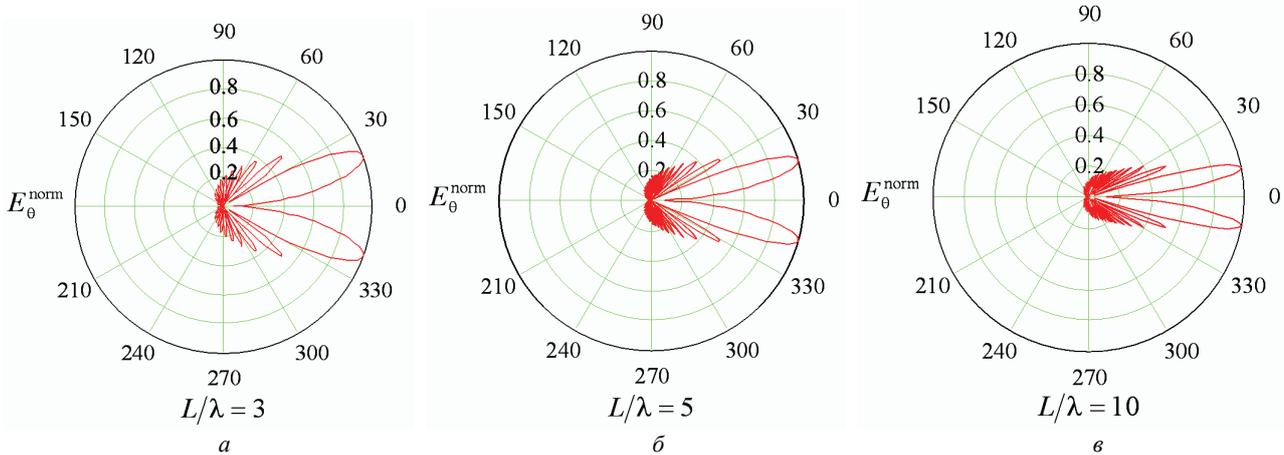


Рисунок 2 – Нормированные диаграммы направленности для различной длины одиночного излучающего проводника

Увеличение длины излучающего проводника приводит к тому, что максимум излучения приближен к его оси. Приведенные на рис. 2 нормированные к максимальному значению E_{θ}^{\max} диаграммы направленности $E_{\theta}^{\text{norm}} = |E_{\theta}|/|E_{\theta}^{\max}|$ для относительной длины провода $L/\lambda = 3; 5; 10$, соответственно, рис. 2, а, рис. 2, б, рис. 2, в.

При этом может иметь место наложение диаграмм направленности передающей антенны приемопередатчика и излучающего провода ЛЭП (рис. 3).

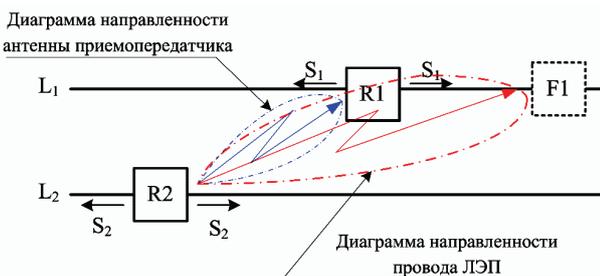


Рисунок 3 – Наложение диаграмм направленности антенны приемопередатчика и излучающего проводника ЛЭП

Таким образом, в результате излучения провода L_2 имеет место интерференция сигналов S_1 и S_2 в окрестности приемопередатчика TR1, что может быть устранено или ослаблено при установке дополнительного заграждающего фильтра F1.

С учетом того, что наибольшее распространение для передачи ВЧ сигнала по проводам ЛЭП получила схема «фаза-земля» [16], использование обычных полосовых или заграждающих фильтров затруднительно, так как необходимо предусмотреть соединение с

«землей» [17, 18].

Однако данная схема включения может привести к короткому замыканию высоковольтных проводов ЛЭП через элементы фильтров на «землю». Поэтому чаще применяют схемы разделительных фильтров, построенных на основе колебательных контуров [16] (рис. 4).

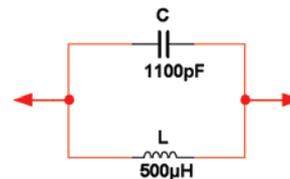


Рисунок 4 – Упрощенная схема разделительного фильтра

Данный фильтр по сути является параллельным колебательным контуром. Для моделирования его характеристик воспользуемся программным пакетом Multisim 12 [19].

Рассмотрим частный случай. Предположим, что в результате интерференции сигнала от передающей антенны приемопередатчика и сигнала, излучаемого проводником ЛЭП, возникла интерференционная помеха на частоте 213 кГц.

Для ее ослабления включим в разрыв проводов ЛЭП разделительный фильтр. Зададим значение его емкости равной $C = 1100$ пФ и индуктивности $L = 500$ мкГн. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) такого фильтра, полученная в программной среде Multisim 12, приведена на рис. 5.

В данном случае центральная частота, вырезаемая фильтром, приведенным на рис. 4, равна $f = 213,342$ кГц, при этом ослабление сигнала на данной частоте равно $\Delta = -37,459$ дБ. Ширина полосы, в пределах которой сигнал ослабляется на 10 дБ, равна $\Delta f \approx 20$ кГц (см. рис. 5).

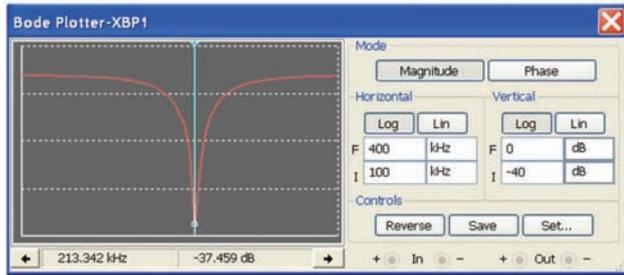


Рисунок 5 – Амплитудно-частотная характеристика параллельного частотного контура на рис. 4, полученная в Multisim 12

Важный фактор состоит так же в том, что необходимо учитывать влияние конструктивных параметров, а также внешних факторов на значение номиналов реактивных элементов фильтра.

Рассмотрим, как изменится АЧХ фильтра с учетом паразитных емкостей, индуктивностей и сопротивлений. Для этого заменим индуктивность L и емкость C фильтра, приведенного на рис. 4 эквивалентными схемами замещения, приведенными на рис. 6 [20].

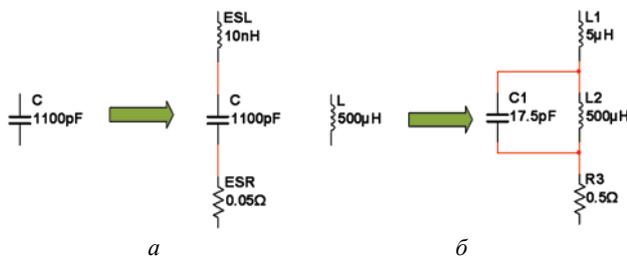


Рисунок 6 – Модели электронных компонентов: *a* – конденсатор; *б* – катушка индуктивности

Для реального конденсатора существенны эквивалентная последовательная индуктивность (ESL) и эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) (рис. 6, *a*).

Катушка индуктивности имеет паразитную емкость C_{coil} , которая образует параллельный колебательный контур, и индуктивность рассеяния и активное сопротивление (см. рис. 6, *б*).

Параметры паразитных элементов с учетом разброса значений приведены в табл. 1 [21].

Таблица 1 – Характерные паразитные параметры компонентов

Компонент	Паразитный параметр	Типичный разброс
Конденсатор	Эквивалентное сопротивление, ESR	0,05 – 10 Ом
	Эквивалентная индуктивность, ESL	10 – 100 нГн
Дроссель	Индуктивность рассеяния, L_{dis}	1 – 8% от L (обмотки)
	Емкость обмоток, C_{coil}	10 – 30 пФ

С учетом вышесказанного упрощенная схема из рис. 4 трансформирована в представленную на рис. 7.

АЧХ фильтра с учетом схемы замещения (см. рис. 7) приведена на рис. 8.

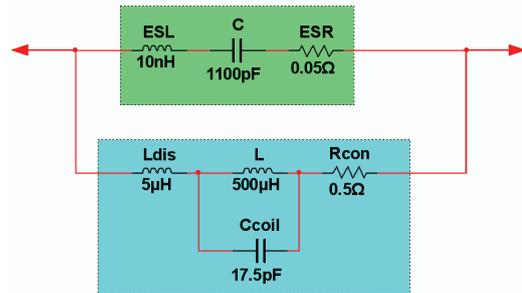


Рисунок 7 – Схема разделительного фильтра с учетом паразитных параметров элементов

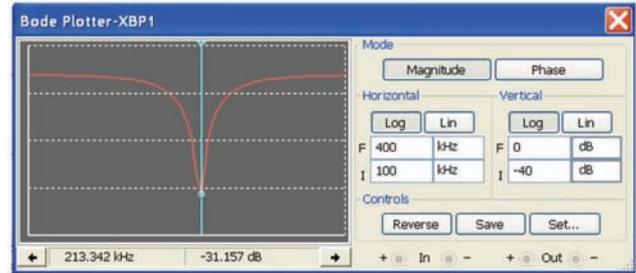


Рисунок 8 – Амплитудно-частотная характеристика параллельного частотного контура на рис. 7, полученная в Multisim 12

Учет паразитных параметров компонентов фильтра (рис. 7) не приводит к изменению вырезаемой им центральной частоты. Она остается неизменной и равна $f = 213,342$ кГц. Однако ослабление сигнала вследствие влияния паразитных параметров компонентов фильтра на данной частоте уменьшается и равно $\Delta = -31,157$ дБ. Ширина полосы, в пределах которой сигнал ослабляется на 10 дБ, также остается неизменной и равна $\Delta f \approx 20$ кГц.

Отсюда следует, что наличие паразитных составляющих элементов заграждающего фильтра уменьшает ослабление сигнала на центральной частоте на ~ 6 дБ, однако рабочая полоса частот Δf остается при этом неизменной.

В литературе [17, 18] для увеличения их избирательности в ряде случаев рекомендуется последовательное включение нескольких звеньев.

В качестве примера на рис. 9 приведена амплитудно-частотная характеристика двух последовательно соединенных звеньев (контуров) разделительного фильтра, показанного на рис. 7.

В данном случае ослабление на центральной частоте $f = 213,342$ кГц составит $\Delta = -51,351$ дБ.

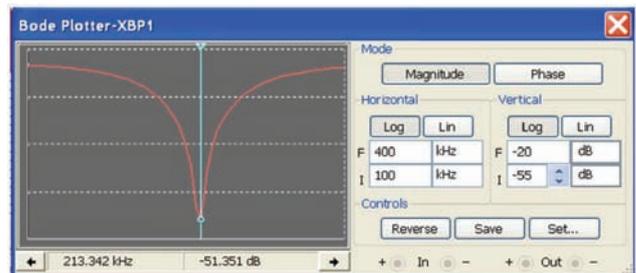


Рисунок 9 – Амплитудно-частотная характеристика двух последовательно соединенных контуров на рис. 8, полученная в Multisim 12

Выводы. В статье рассмотрен механизм возникновения интерференционных помех в результате наложения диаграмм направленности антенн приемопередатчиков проводно-беспроводной (гибридной) системы передачи данных и излучающих проводников ЛЭП.

Для уменьшения интерференционных помех предложено дополнить имеющиеся проводно-беспроводные PLC системы дополнительными загораживающими фильтрами на основе параллельного колебательного контура.

Показано, что наличие паразитных параметров компонентов фильтра уменьшает ослабление сигнала помехи. Для уменьшения амплитуды интерференционной помехи целесообразно последовательное включение нескольких звеньев колебательных контуров с одинаковыми параметрами.

Список литературы: 1. *Микуцкий Г.В.* Высокочастотная связь по линиям электропередачи / *Г.В. Микуцкий, В.С. Скитальцев.* – М.: Энергия, 1977. – 440 с. 2. *Шкарин Ю.П.* Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи / *Ю.П. Шкарин.* – Энергетик: Энергопрогресс, 2001. – 150 с. 3. *Дейтрих К.* Системы ВЧ связи по ЛЭП / *К. Дейтрих* // Коммуникационные решения для электрических сетей. – *Электротехнический рынок.* – 2007. – № 11 (17). 4. *Bumiller G.* Power Line Communication Networks for Large-Scale Control and Automation Systems / *G. Bumiller, L. Lampe, H. Hrasnica* // IEEE Communications Magazine. – April 2010. – Vol. 48, iss. 4. – P. 106-113. 5. *Lasciandare A.* Experimental field trials of a utility AMR power line communication system analyzing channel effects and error correction methods / *A. Lasciandare, S. Garotta, F. Veroni, E. Saccani, L. Guerrieri, D. Arrigo* // IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. – 2007. – ISPLC '07. – Pisa, Italy, 26-28 March 2007. 6. *Mainardi E.* Powerline Communication in Home-Building Automation Systems / *E. Mainardi, M. Bonfi* // Chapter 4 of the book «Robotics and Automation in Construction» edited by C. Balaguer and M. Abderrahim – InTech – Chapters published October 01 – 2008. 7. *Bshara M.* Potential effects of power line communication on xDSL inside the home environment / *M. Bshara, L. Van Biesen, J. Maes* // Proceedings of VIII Semetro. – Brazil: 2009. 8. *Horvat G.* Power Line Communication Throughput Analysis for Use in Last Mile Rural Broadband / *G. Horvat, Z. Balkić, D. Žagar* // 20th Telecommunications forum TELFOR 2012. – Belgrade, Serbia. – 20-22 November, 2012. 9. Pat. US006933835 Data communication over a power line / *Paul A. Kline* (Germantown, MD). – Current Technologies, LLC (Germantown, MD) – Aug. 23, 2005. 10. Pat. US006993317 Method and system for signal repeating in powerline communications / *Jr. Belsak, C. Frederick.* – (Newton, NH) – Amperion, Inc. (Andover, MA). – Jan. 31, 2006. 11. CISPR/TR 18-1, Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment – Part 1: Description of phenomena, edition 2.0, 2010-06. 12. CISPR/TR 18-2, Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment – Part 2: Methods of measurement and procedure for determining limits, edition 2.0, 2010-06. 13. CISPR/TR 18-3, Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment – Part 3: Code of practice for minimizing the generation of radio noise, edition 2.0, 2010-06. 14. *Carson J.R.* Wave propagation in overhead wires with ground return / *J.R. Carson* // Bell System Techn. Journ. – 1926. – V. 5, № 4. – P. 539–554. 15. *Stratton J.A.* Electromagnetic theory / *J.A. Stratton* // McGraw-Hill book company, inc. – 1941. – 615 p. 16. *Ишкин В.Х.* Справочник по проектированию систем передачи информации в энергетике / *В.Х. Ишкин, С.С. Рокотян.* – М.: Энергия, 1977. – 384 с. 17. *Ред Э.* Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике /

Э. Ред. – М.: Мир, 1990. – 253 с. 18. *Шахгильдян В.В.* Радиопередающие устройства / *В.В. Шахгильдян.* – М.: Радио и связь, 2003. – 560 с. 19. National Instruments. Products of NI, Circuit design software. Multisim 12.0 // www.ni.com/multisim/. 20. *Pilinsky V.* Assessment of Electromagnetic Environment Mains occurring by SMPS & PLC Systems / *V. Pilinsky, A. Rozvadovsky, I. Zaicev* // Proceedings of the 11-th Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2012». – Rome, Italy, Sept. 17-21. – 6 p. 21. *Браун М.* Источники питания. Расчет и конструирование / *М. Браун.* – М.: МК-Пресс, 2007 – 288 с.

Bibliography (transliterated): 1. G.V. Mikulitskiy, V.S. Skitaltsev. High-frequency power line communications. Moscow, Energy, 1977. 440 p. (in Russian). 2. Yu.P. Shkarin, High frequency channels in power line communication. Moscow, Energoprogress, 2001. 150 p. (in Russian). 3. K. Dietrich. High frequency communication systems for power lines. Communication solutions for electrical networks. Electrical Market. № 11(17), November 2007 (in Russian), <http://www.market.elec.ru>. 4. G. Bumiller, L. Lampe, H. Hrasnica. Power Line Communication Networks for Large-Scale Control and Automation Systems. IEEE Communications Magazine, Vol. 48, Issue 4, April 2010. pp. 106-113. 5. A. Lasciandare, S. Garotta, F. Veroni, E. Saccani, L. Guerrieri, D. Arrigo. Experimental field trials of a utility AMR power line communication system analyzing channel effects and error correction methods. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2007. ISPLC '07, Pisa, Italy, 26-28 March 2007. 6. E. Mainardi, M. Bonfi. Powerline Communication in Home-Building Automation Systems. Chapter 4 of the book Robotics and Automation in Construction. edited by C. Balaguer and M. Abderrahim, InTech, Chapters published October 01, 2008. 7. M. Bshara L. Van Biesen, J. Maes. Potential effects of power line communication on xDSL inside the home environment. Proceedings of VIII Semetro, Brazil, 2009. 8. G. Horvat, Z. Balkić, D. Žagar. Power Line Communication Throughput Analysis for Use in Last Mile Rural Broadband. 20th Telecommunications forum TELFOR 2012, Belgrade, Serbia, 20-22 November, 2012. 9. Pat. US006933835. Data communication over a power line. Paul A. Kline (Germantown, MD), Current Technologies, LLC (Germantown, MD), Aug. 23, 2005. 10. Pat. US006993317. Method and system for signal repeating in powerline communications. Belsak, Jr.; Frederick C. (Newton, NH), Amperion, Inc. (Andover, MA), Jan. 31, 2006. 11. CISPR/TR 18-1, Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment. Part 1: Description of phenomena, edition 2.0, 2010-06. 12. CISPR/TR 18-2, Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment. Part 2: Methods of measurement and procedure for determining limits, edition 2.0, 2010-06. 13. CISPR/TR 18-3, Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment. Part 3: Code of practice for minimizing the generation of radio noise, edition 2.0, 2010-06. 14. Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. J.R. Carson. Bell System Techn. Journ. 1926. V.5, № 4. pp. 539–554. 15. J.A. Stratton. Electromagnetic theory. McGraw-Hill book company, inc., 1941. 615 p. 16. V.Kh. Ishkin, S.S. Rokotyanyan. Reference book for design of communication systems in the energy sector. Moscow: Energy, 1977. 384 p. (in Russian). 17. E. Red. Reference book on microwave engineering. Moscow: Mir, 1990, 253 p. (in Russian). 18. V.V. Shakhgildyan. Radio transmitters. Moscow: Radio and communications, 2003. 560 p. (in Russian). 19. National Instruments. Products of NI, Circuit design software. Multisim 12.0 // www.ni.com/multisim/. 20. V. Pilinsky, A. Rozvadovsky, I. Zaicev, Assessment of Electromagnetic Environment Mains occurring by SMPS & PLC Systems, Proceedings of the 11-th Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2012», Rome, Italy, Sept. 17-21. 6 p. 21. M. Brown, Owner Supply Cookbook, 2-nd edition. Newnes, Oxford.

Надійшла (received) 31.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Розвадовский Андрей Федорович – младший научный сотрудник, ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН»; email: rozvadovsky@yandex.ru.

Rozvadovskiy Andrey Fedorovich – junior researcher, FSIS «Marine Hydrophysical Institute RAS», Sevastopol; e-mail: rozvadovsky@yandex.ru.

Лазебный Владимир Семенович – кандидат технических наук, доцент Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»; тел.: (067)387-69-10; e-mail: smartvs@mail.ru.

Lazebny Vladimir Semenovich – Candidate of Technical Sciences, Ass. Professor, National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev, tel.: (067)387-69-10; e-mail: smartvs@mail.ru.

Пилинский Владимир Владимирович – кандидат технических наук, профессор Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»; тел.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net.

Pilinsky Vladimir Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev, tel.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net.

УДК 681.5

Н. В. САВЧЕНКО, Д. А. ПАНАСЕНКО**ИНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ**

На основі побудови формалізованих моделей для захворювань печінки (хронічний гепатит і цироз), описана залежність результуючого діагнозу від результатів обстеження пацієнта, яка реалізована в програмі. Представлені етапи отримання моделей, а також наведені експериментальні вагові коефіцієнти, використовувані при побудові моделі. Всього моделей із зазначеними характеристиками 33.

Ключові слова: хронічний гепатит, цироз, діагноз, математичне моделювання, модель множинної регресії, програмний продукт.

Вступ. В даний час проблеми зі здоров'ям, різного характеру, зустрічаються практично у кожній людини. Отже, необхідно з високою точністю та швидкістю визначати, на що хворий пацієнт, і проводити в найкоротші терміни всі дії, спрямовані на його лікування. Для того щоб коректно поставити діагноз, потрібно проводити ряд діагностик, які на сьогоднішній день не володіють відносно доступними й ефективними технологіями. Не є винятком і діагностика захворювань печінки (хронічний гепатит і цироз). Саме тому завдання вдосконалення методів діагностики різних захворювань печінки як і раніше є актуальною як з точки зору практичних застосувань, так і з позиції теоретичної медичної науки, розвиваючи математичне моделювання різних захворювань.

Виходячи з цього, автоматизована побудова формалізованих моделей для захворювань печінки (хронічний гепатит і цироз).

В якості основного підходу обраний метод регресійного аналізу сукупності лінійних моделей, що пов'язують можливі значення діагнозу з показниками, отриманими на основі обстеження пацієнта. Лінійний регресійний аналіз дозволяє будувати лінійні залежності між наборами пояснювальних змінних та які пояснюють. Використання нелінійних методів поки недоцільно через низьку якість вихідних даних. Використання методів регресійного аналізу для побудови моделей різних процесів, у тому числі і в медицині, не є новим [1]. Повний аналіз даного питання проведено в [2]. Серед нових напрямків щодо використання методів регресійного аналізу в медицині можна вказати

логістичні моделі [2], а також виділимо деякі підходи [3 - 4], що представляють інтерес з точки зору розвитку методів даного дослідження. Дану задачу часто відносять до такого напрямку як – доказова медицина [5, 6].

На відміну від зазначених робіт, дана робота передбачає програмну реалізацію побудови набору моделей, які в сукупності використовуються при виявленні діагнозу.

Це пов'язано з тим, що наявні дані, на даний момент не дозволяють побудувати модель, що задовольняє всім вимогам до неї за достовірністю та надійністю пророкувань діагнозу на її основі. Як вихід з даної ситуації і пропонується побудова набору моделей, використовуючи програму і які є кращими зі складу тих моделей, які можна побудувати на основі даних, якими володіємо. По мірі наповнення бази даних по пацієнтам число моделей в кінцевому наборі буде зменшуватися до тих пір, поки не залишиться одна модель. Також слід розуміти, що в міру розвитку медичної науки і практики з'являються нові діагностичні показники, і в даних по пацієнтам, зібраних до появи цих показників, які відповідають цим показникам графі будуть порожні. Наявність таких перепусток обумовлено, насамперед, тим, що поки не у всіх медичних установах можуть бути виконані всі показники, які перераховані нижче. Таким чином, проблема прогалин у даних буде існувати довго, що вказує на важливість даної роботи.

Аналіз методів діагностики захворювань печінки. Для того щоб побудувати математичні моделі,

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Розвадовский Андрей Федорович – младший научный сотрудник, ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН»; email: rozvadovsky@yandex.ru.

Rozvadovskiy Andrey Fedorovich – junior researcher, FSIS «Marine Hydrophysical Institute RAS», Sevastopol; e-mail: rozvadovsky@yandex.ru.

Лазебний Владимир Семенович – кандидат технических наук, доцент Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»; тел.: (067)387-69-10; e-mail: smartvs@mail.ru.

Lazebny Vladimir Semenovich – Candidate of Technical Sciences, Ass. Professor, National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev, tel.: (067)387-69-10; e-mail: smartvs@mail.ru.

Пилинский Владимир Владимирович – кандидат технических наук, профессор Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»; тел.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net.

Pilinsky Vladimir Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev, tel.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net.

УДК 681.5

Н. В. САВЧЕНКО, Д. А. ПАНАСЕНКО

ИНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

На основі побудови формалізованих моделей для захворювань печінки (хронічний гепатит і цироз), описана залежність результуючого діагнозу від результатів обстеження пацієнта, яка реалізована в програмі. Представлені етапи отримання моделей, а також наведені експериментальні вагові коефіцієнти, використовувані при побудові моделі. Всього моделей із зазначеними характеристиками 33.

Ключові слова: хронічний гепатит, цироз, діагноз, математичне моделювання, модель множинної регресії, програмний продукт.

Вступ. В даний час проблеми зі здоров'ям, різного характеру, зустрічаються практично у кожній людини. Отже, необхідно з високою точністю та швидкістю визначати, на що хворий пацієнт, і проводити в найкоротші терміни всі дії, спрямовані на його лікування. Для того щоб коректно поставити діагноз, потрібно проводити ряд діагностик, які на сьогоднішній день не володіють відносно доступними й ефективними технологіями. Не є винятком і діагностика захворювань печінки (хронічний гепатит і цироз). Саме тому завдання вдосконалення методів діагностики різних захворювань печінки як і раніше є актуальною як з точки зору практичних застосувань, так і з позиції теоретичної медичної науки, розвиваючи математичне моделювання різних захворювань.

Виходячи з цього, автоматизована побудови формалізованих моделей для захворювань печінки (хронічний гепатит і цироз).

В якості основного підходу обраний метод регресійного аналізу сукупності лінійних моделей, що пов'язують можливі значення діагнозу з показниками, отриманими на основі обстеження пацієнта. Лінійний регресійний аналіз дозволяє будувати лінійні залежності між наборами пояснювальних змінних та які пояснюють. Використання нелінійних методів поки недоцільно через низьку якість вихідних даних. Використання методів регресійного аналізу для побудови моделей різних процесів, у тому числі і в медицині, не є новим [1]. Повний аналіз даного питання проведено в [2]. Серед нових напрямків щодо використання методів регресійного аналізу в медицині можна вказати

логістичні моделі [2], а також виділимо деякі підходи [3 - 4], що представляють інтерес з точки зору розвитку методів даного дослідження. Дану задачу часто відносять до такого напрямку як – доказова медицина [5, 6].

На відміну від зазначених робіт, дана робота передбачає програмну реалізацію побудови набору моделей, які в сукупності використовуються при виявленні діагнозу.

Це пов'язано з тим, що наявні дані, на даний момент не дозволяють побудувати модель, що задовольняє всім вимогам до неї за достовірністю та надійністю пророкувань діагнозу на її основі. Як вихід з даної ситуації і пропонується побудова набору моделей, використовуючи програму і які є кращими зі складу тих моделей, які можна побудувати на основі даних, якими володіємо. По мірі наповнення бази даних по пацієнтам число моделей в кінцевому наборі буде зменшуватися до тих пір, поки не залишиться одна модель. Також слід розуміти, що в міру розвитку медичної науки і практики з'являються нові діагностичні показники, і в даних по пацієнтам, зібраних до появи цих показників, які відповідають цим показникам графі будуть порожні. Наявність таких перепусток обумовлено, насамперед, тим, що поки не у всіх медичних установах можуть бути виконані всі показники, які перераховані нижче. Таким чином, проблема прогалин у даних буде існувати довго, що вказує на важливість даної роботи.

Аналіз методів діагностики захворювань печінки. Для того щоб побудувати математичні моделі,

які описують залежність діагнозу від вхідних факторів (результати аналізу і попереднього обстеження пацієнта), необхідно оцінити, наскільки наявні дані дозволяють сформулювати бажану модель.

Великі набори спостережень мають ряд істотних недоліків:

1. За багатьма характеристиками для великих груп хворих вихідні дані відсутні по ряду причин. По-перше, збір даних вимагає тривалого періоду часу, а по ряду характеристик такі матеріали стали збиратися відносно нещодавно, тому для більш ранніх спостережень ці дані відсутні. По-друге, діагностичні обстеження хворих можуть проводитися не за всіма характеристиками, тобто набори аналізів в історіях хвороб неповні. Також слід враховувати, що дані можуть формуватися лише на основі карток хворих, тому історії хвороб відсутні.

2. Необхідно розуміти, що дані в ряді випадків недостатньо точні; особливо дані, в основі яких лежать суб'єктивні відчуття пацієнта і думки лікаря.

У зв'язку з вищевказаним виникає необхідність врахування проблеми низької якості вихідних даних у процесі моделювання. Для вирішення даної проблеми можна спробувати доповнити відсутні дані, покладаючись на сучасні математичні методи згладжування та екстраполяції даних. На жаль, даний метод не підходить, тому прогалини в даних можуть бути значними. Інший шлях – побудова цілої серії моделей, що спираються на різні групи з окремих показників, за якими можливо побудувати прийнятні моделі. У міру збільшення обсягу спостережень, отримані моделі будуть уточнюватися, окремі моделі будуть відкидатися зважаючи на появу більш якісних моделей, поки в кінцевому результаті не буде отримана одна чи кілька не покращуваних моделей.

Процедура побудови регресійних моделей.

Нижче представлена загальна процедура побудови регресійних моделей, яка реалізована до захворювань печінки. Процедура складається з наступних етапів:

1. Обчислюються коефіцієнти попарної кореляції між усіма характеристиками, які можуть бути представлені в таблиці, і насамперед коефіцієнти кореляції між діагнозом і рештою характеристик.

2. Зони всіх можливих значень модуля коефіцієнта кореляції (тобто відрізка $[0; 1]$) розбиваються на наступні сім зон:

– від 0 до 0,01, не включаючи праву межу. Це зона, при попаданні в яку коефіцієнти кореляції відповідні характеристики можна вважати практично незалежними. Стосовно до розглянутої задачі це означає недостатній обсяг вихідних даних, що не дозволяє залежності реалізуватися. Застосовуючи до діагностування при достатньо великому обсязі даних це означає, що захворювання практично не залежить від даної характеристики, і немає необхідності проводити лабораторний аналіз хворого за даним показником;

– від 0,01 до 0,1, не включаючи граничне значення. Це зона дуже слабкої залежності характеристик. Висновки в цілому аналогічні попереднім: в цілому показники незалежні. Однак, якщо одна з характеристик – діагноз, то в окремих рідкісних випадках захво-

рування і дана характеристика можуть виявитися залежними. Відкидати дані значення недоцільно, тому при великій кількості слабо корельованих з діагнозом змінних модель регресії, побудована за цим змінним, може виявитися досить якісною;

– від 0,1 до 0,3 (не включаючи) – зона слабкої залежності характеристик, яка типова для багатьох нетехнічних сфер діяльності. Характеристики, що потрапили в цю групу, зазвичай домінують і є основою формування регресійних моделей;

– від 0,0 до 0,7 (не включаючи) – зона середньої залежності. Показники, що потрапили в дану зону, вимагають уважного вивчення, оскільки таких показників зазвичай дуже мало, але вони досить сильно взаємопов'язані з діагнозом. Відзначимо, однак, що, як було зазначено вище, середня і сильна залежність може бути обумовлена також малим об'ємом аналізованих даних, спільних для даної характеристики і діагнозу;

– від 0,7 до 0,9 (не включаючи) – зона підвищеної залежності. Відзначимо, що подібні показники в медицині зустрічаються відносно рідко, оскільки багато захворювань, мабуть, надають неповний, частковий вплив на супутні їм фактори зважаючи на складний, комплексний характер самих захворювань (до подібних захворювань відносяться і захворювання печінки)

– від 0,9 до 0,95 – зона сильної залежності, яка застосовна до медичної сфери, де вимоги до характеру залежностей між змінними менш жорсткі в порівнянні, наприклад, з технічними сферами, відповідні величини зазвичай вважаються практично лінійно залежними, і тому одна з цих величин може бути відкинута. Дане положення (про лінійної залежності) неприйнятне, зокрема, для унікальних поєднань вихідних даних, що відображають специфічний характер залежностей між величинами;

– від 0,95 до 1,0 – зона дуже сильної залежності. У цьому випадку досліджувані величини практично лінійно залежні при будь-яких наборах вихідних даних.

3. Із стовпця, зіставленого для запису діагнозу, вибираються рядки, в яких коефіцієнт кореляції потрапляє в зону середньої і вище залежностей. Чинники, зіставлені цим рядкам, і вибираються в якості пояснюючих параметрів шуканої регресійної моделі.

4. Аналізуються коефіцієнти взаємної кореляції між різними парами базових чинників. Якщо зустрічаються пари чинників з сильною або дуже сильною залежністю, то один з цих чинників виводиться із складу базового набору чинників.

5. Будуються моделі множинної регресії для різних поєднань цих чинників. При побудові моделей необхідно одночасно відмітити виведення для кожної моделі також наступних параметрів: об'єм вибірки, використаної при побудові моделі (беруться тільки ті набори з початкового набору даних, в яких усі поля для усіх аналізованих чинників заповнені (не порожні)); вірогідність довіри до моделі (коефіцієнт значущості моделі), обчислена на основі використання розподілу Стюдента.

6. З отриманого складу моделей виділяються мо-

делі, найбільш ефективні з точки зору коефіцієнта детермінації R^2 : чим ближче коефіцієнт R^2 до одиниці, тим точніше (з меншою помилкою) побудована модель множинної регресії описує діагноз. Найбільш типові порогові значення для R^2 – 0,95, рідше – 0,9.

7. З виділених моделей робиться повторний вибір на основі порівняння коефіцієнтів значущості (вірогідності на основі критерію Фишера), що описують рівень довіри до моделі; а саме наскільки отримані характеристики моделі можуть бути пояснені випадковим поєднанням значень чинників, що входять в модель. Типові порогові значення в переважному числі додатків приймаються рівними 0,05, рідше – 0,1. Виділений в результаті набір моделей і є шуканим.

8. Виписуються рівняння для усіх отриманих моделей множинної регресії в порядку зростання основного (першого) критерію порівняння моделей. Кожне з цих рівнянь може бути використане для визначення діагнозу, що має два варіанти (або перше захворювання, або друге), коли одержувані в кожному конкретному випадку значення змінної, які відповідають діагнозу, замінюються найближчим з чисел – 0 або 1. Тоді значення 0 відповідає першому захворюванню, а значення 1 – другому. Аналогічні процедури будуються і при багатозначному варіанті результуючого діагнозу.

9. В результаті реалізації процедури, описаної в пункті 8, в частині моделей результат може виявитися рівним 0, а для іншої частини – 1. В цьому випадку для отримання результуючого діагнозу може бути використана одна з наступних процедур.

А. В якості результуючого значення Y береться середнє значення, отримане усереднюванням значень y_i , з вагами, пропорційними коефіцієнтам довіри q_i .

$$Y = \frac{\sum_1^n q_i \cdot y_i}{\sum_1^n q_i}, \quad (1)$$

де n – число моделей в остаточному переліку; y_i – значення діагнозу в i -й моделі;

$$q_i = 1 - p_i, \quad (2)$$

де p_i – коефіцієнт значимості моделі.

Потім значення Y округлюється до 0 або 1 (аналогічно пункту 8), і отримане значення і визначає остаточний діагноз.

Б. Якщо усі y_i рівні 0 чи 1, то Y дорівнює 0 або 1 відповідно. Якщо ж частина y_i рівні 0, а частина – 1, то призначається додаткове обстеження пацієнта з метою діагностування захворювання або уточнення значень факторів, що входять в вибрані моделі.

Таблиця 1 – Експериментальні вагові коефіцієнти

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_5	b_6	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}
Y_1	1,06					-0,071	-0,35						
Y_2	1,2								-0,096		-0,15		
Y_3	0,17											0,05	0,057
Y_4	0,85										-0,19	0,03	
Y_5	0,29										-0,12	0,065	
Y_6	2,14	2,002	-0,013								-0,22		
Y_7	1,6	0,0007	0,011										
Y_8	1,54		-0,007			-0,16							
Y_9	1,65		-0,013										0,0098
Y_{10}	1,82	-0,002	-0,014										0,0023
Y_{11}	1,77	-0,0006	-0,009			-0,15							
Y_{12}	0,58						-0,045	0,0007				0,049	
Y_{13}	1,9		-0,011				-0,05						
Y_{14}	1,26						0,04	0,005	0,04				
Y_{15}	0,75		-0,007									0,055	
Y_{16}	1,56		-0,01					-0,012					
Y_{17}	0,91	-0,02	-0,008									0,057	
Y_{18}	2,2	-0,004	-0,017					-0,008					
Y_{19}	1,5						-0,017	-0,0065	0,041		-0,3		
Y_{20}	1,55				-0,02	-0,16						0,006	
Y_{21}	1,44							-0,007	0,06		-0,38		
Y_{22}	1,76	-0,0004	-0,01		-0,008								
Y_{23}	1,7		-0,009		-0,0084								
Y_{24}	1,008				0,006	-0,05	-0,04						
Y_{25}	1,2						-0,036	-0,004	-0,013				0,06
Y_{26}	1,05						-0,03	0,002	-0,19			0,01	
Y_{27}	0,8							0,001	-0,19			0,0006	
Y_{28}	2,3			0,3				-0,09					
Y_{29}	1,5			-0,5			-0,08						
Y_{30}	0,38			-0,75							0,125		
Y_{31}	0,6			-0,6									
Y_{32}	0,6			-0,6		0,000001							
Y_{33}	0,9	-0,006		-0,8									

Формування набору моделей вибору діагнозу по захворюваннях печінки. Моделі були побудовані з використанням програмної системи EViews 8.0. Загальна кількість таких моделей склало 160 штук.

Аналіз результатів посприяв отримати наступні результати.

Були перебрані різні поєднання вихідних факторів і для кожного з поєднань побудована відповідна модель множинної регресії, а також обчислені її необхідні характеристики: обсяг використаних даних, коефіцієнт детермінації, ймовірність помилки на основі F-статистики. При досить великому числі факторів (більше 4) моделі не виходили через відсутність спільних даних у вибраній сукупності факторів. У результаті розрахунку було побудовано 160 моделей, що охоплюють різні набори пояснюючих показників. За 87 набором показників моделі не відбулися – або значення коефіцієнта детермінації R^2 занадто малі (менше 0,1), або R^2 відсутня зважаючи на тривіальність отриманої моделі. Основна причина цього: для багатьох наборів параметрів зважаючи на малий обсяг загальних вихідних даних значення більшості з цих параметрів постійні на загальних даних. Крім того, є припущення, що вихідні дані являють собою суміш лінійно залежних змінних і накладених на них окремих викидів, відповідних нетиповому перебігу захворювання. На малих обсягах викиди мало ймовірні, і, отже, залежність діагнозу описується лінійною складовою. У міру поповнення вихідних даних ситуація за складом моделей може кардинально змінитися: моделі, які раніше виявилися несуттєвими, можуть опинитися в числі найбільш важливих, і навпаки.

Однак набір даних, який є в даний час призводить до зазначених результатів. Моделі були впорядковані в порядку зростання коефіцієнта r .

Далі представлено рівняння множинної регресії у загальному вигляді, а також для кожної з моделей в табл. 1 наведені вагові коефіцієнти, (позначення представлені після таблиці).

$$Y_i = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_k \cdot X_k. \quad (3)$$

Розшифровка позначень: Y_i – діагноз для i -ї моделі (0 – хронічний гепатит, 1 – цироз), X_1 – загальний білірубін при вступі, мкмоль/л, X_2 – протромбіновий індекс, %, X_3 – етанолів тест (0_1), X_4 – фібриноген В (0_1), X_5 – розмір хвоста підшлункової залози за даними ультразвукового дослідження (УЗД), мм, X_6 – стан шлунку за даними фіброгастроскопії (ФГС) (0 – норма, 1 – гастрит / гастродуоденіт, 3 – ерозії в шлунку або 12-палої кишці, 4 – виразка в шлунку або 12-палої кишці), X_7 – антитіла до Pseudomonasspp., мкг / мл, X_8 – антитіла до Streptococcuspp., мкн / мл, X_9 –

антитіла до Escherichiacoli, мкн / мл, X_{10} – антитіла до мікоплазми класу LgG (0 – ні, 1 – низький титр, 2 – високий титр), X_{11} – антитіла до вірусу гепатиту А класу LgG (0 – ні, 1 – низький титр, 2 – високий титр), X_{12} – активність запалення (1-2-3 ступінь), X_{13} – діаметр селезінкової вени по УЗД, мм, X_{14} – конкременти в жовчному міхурі по УЗД (0 – не має патології, 1 – осад, 2 – камені без ускладнень, 3 – ускладнена жовчнокам'яна хвороба).

Висновки. На основі розроблених моделей, створено програмне забезпечення, що дозволяє проводити оперативну діагностику захворювань печінки.

Список літератури. 1. Медик В. А. Руководство по статистике в медицине и биологии. Т. 2. Прикладная статистика здоровья / В. А. Медик, Б. Б. Фишман, М. С. Токмачев. – М.: Медицина, 2001. – 352 с. 2. Леонов В. П. Статистика в кардиологии. 15 лет спустя / В. П. Леонов // Медицинские технологии. Оценка и выбор. – 2014. – № 1. – С. 17–28. 3. URL: http://www.biometrica.tomsk.ru/logit_1.htm. 4. Bruijne M. H. J. de. On the use of Cox regression in the presence of an irregularly observed time dependent covariate / M. H. J. de Bruijne, S. le Cessie, H. C. Kluine-Nelemas, H. C. van Houwelingen // Statistic in medicine. – 2001. – Vol. 20. No 24. – P. 3817–3829. 5. Marshall G. Prospective prediction in the presence of missing data / G. Marshall, B. Warner, S. MaWhinney, K. Hammermeister // Statistics in Medicine. – 2002. – Vol. 21, No 4. – P. 561-570. 6. Реброва О. Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTIKA / О. Ю. Реброва. – М.: Медиа Сфера, 2002. – 312 с. 7. Петров В. И. Клиническое мышление и доказательная медицина / В. И. Петров. 8. Власов В. В. Применение теории доказательств в медицине / В. В. Власов, Н. Н. Седова.

Bibliography (transliterated): 1. Medik V. A. Rukovodstvo po statistike v meditsine i biologii. T. 2. Prikladnaya statistika zdorov'ya. V. A. Medik, B. B. Fishman, M. S. Tokmachev. M.: Meditsina, 2001. 352 p. 2. Leonov V. P. Statistika v kardiologii. 15 letspustya / V. P. Leonov. Meditsinskie tekhnologii. Otsenka i vybor. 2014. No 1. pp. 17-28. 3. URL:http://www.biometrica.tomsk.ru/logit_1.htm. 4. Bruijne M. H. J. de. On the use of Cox regression in the presence of an irregularly observed time dependent covariate / M. H. J. de Bruijne, S. le Cessie, H. C. Kluine-Nelemas, H. C. van Houwelingen // Statistic in medicine. 2001. Vol. 20. No 24. pp. 3817-3829. 5. Marshall G. Prospective prediction in the presence of missing data / G. Marshall, B. Warner, S. MaWhinney, K. Hammermeister // Statistics in Medicine. 2002. Vol. 21. No 4. pp. 561-570. 6. Rebrova O. Yu. Statisticheskiy analiz meditsinskikh dannykh. Primenenie paketa prikladnykh programm STATISTIKA / O. Yu. Rebrova. M.: MediaSfera, 2002. 312 s. 7. Petrov, V. I. Klinicheskoe myshlenie i dokazatel'naya meditsina / V. I. Petrov. pp.15-32. 8. Vlasov V. V. Primenenie teorii dokazatel'stv v meditsine. V. V. Vlasov, N. N. Sedova.

Надійшла (received) 05.04.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Савченко Николай Владимирович – доцент кафедри Системи інформації, кандидат фізико-математических наук, доцент, НТУ «ХПІ», e-mail: nsavchenko77@mail.ru.

Savchenko Nikolay Vladimirovych – Associate Professor at the Department of Information systems, Candidate of Technical Sciences, Docent, NTU "KhPI", e-mail: nsavchenko77@mail.ru.

Панасенко Дмитрій Анатольевич – студент, НТУ «ХПІ», тел. (067) 596-11-82; e-mail: panasenkodmitriy@mail.ru.

Panasenko Dmitriy Anatoltyvych – student, NTU "KhPI", tel. (067) 596-11-82; e-mail: panasenkodmitriy@mail.ru.

УДК 621.762.3:537.528

*А. С. ТОРПАКОВ, О. Н. СИЗОНЕНКО, Э. И. ТАФТАЙ***ВЛИЯНИЕ СОСТАВА РАБОЧЕЙ СРЕДЫ НА СКОРОСТЬ ФРОНТА ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА**

Приведены результаты экспериментальных исследований скорости фронта волны давления с помощью волноводного пьезоэлектрического датчика при высоковольтном электрическом разряде в воде и в воде с добавлением порошка Ti, керосине и керосине с добавлением порошка Ti. Экспериментально установлены условия формирования ударной волны и связь скорости фронта волны давления с дисперсионной средой, количеством дисперсной фазы и параметрами разрядного контура при ВЭР в дисперсной системе «порошок – жидкость».

Ключевые слова: электрический разряд, порошок титана, скорость фронта, ударная волна, дисперсная система.

Введение. Высококачественную полидисперсную шихту для метало-матричных композитов (ММК) можно получать, используя высоковольтный электрический разряд (ВЭР) [1]. При ВЭР в дисперсных системах «порошок – жидкость» на систему воздействует ряд факторов – высокая температура и давление в плазменном канале разряда, волна давления, возникающая при расширении канала разряда, мощные гидротоки при пульсации парогазовой полости, объемная микрокавитация и токи, протекающие через частицы металлического порошка [2]. Использование в качестве дисперсионной среды углеводородной жидкости (в частности, керосина) при ВЭР вызывает ее деструкцию и разложение молекул углеводородов в канале ВЭР и микроплазменных каналах между частицами порошка. Образующиеся при этом частицы нанокремнезема различных аллотропных форм взаимодействуют с частицами обрабатываемого порошка, в результате чего синтезируются дисперсноупрочняющие карбидные фазы [1]. В работах [1, 3, 4] показано, что электроразрядная подготовка порошков к консолидации обладает рядом преимуществ перед механическими методами – отсутствует окисление частиц порошков и загрязнение аппаратным материалом при более высокой энергоэффективности и меньшем времени обработки. В известных работах [1, 3, 4] показана необходимость повышения эффективности ВЭР диспергирования и активации частиц на стадии их взаимодействия с волнами давления.

Анализ основных достижений и литературы. Для обеспечения эффективного диспергирования необходимо создать условия, при которых волна давления будет взаимодействовать с частицами обрабатываемого порошка. Препятствовать этому может явление дифракции, которая происходит, когда длина волны сравнима (или больше) размера находящегося на пути волны объекта (в данном случае частицы порошка). Согласно работам [1, 3, 4] длительность первого полупериода тока в канале разряда при ВЭР подготовке шихты составляет порядка 1 мкс, при этом порядок значения длины волны давления составляет 1 мм [5]. Соответственно, дифракция волны давления на частицах возможна при обработке порошков со средним диаметром менее 1 мм, наиболее часто используемых в порошковой металлургии, что может привести к снижению эффективности механического волнового воздействия, так как при дифракции волна давления

оглабает частицы, не взаимодействуя с ними.

В работе [6] показано, что формирование в среде ударных волн позволяет воздействовать на частицы диаметром значительно менее 1 мм, так как ширина фронта ударной волны в жидкостях не превышает 100 Å. Во фронте ударной волны происходит быстрый рост плотности, давления и температуры жидкости [7], поэтому при взаимодействии фронта ударной волны с частицей в ней возникает скачок давления, плотности, удельной внутренней энергии и других характеристик, который распространяется со сверхзвуковой скоростью. За счет многократных циклических динамических нагрузок происходит накопление локальных градиентов остаточной температуры за фронтом ударной волны, что приводит к снижению энергии разрушения кристаллов [8]. Быстрая разгрузка твердых тел, даже весьма пластичных, нагруженных высоким механическим давлением, приводит к восстановлению равновесных межатомных расстояний в веществе со скоростью, близкой к скорости звука в данном материале. При этом высвободившаяся механическая энергия сжатия переходит в кинетическую энергию отдельных элементов субструктуры материала (микрообъемов). Если эта энергия больше некоторого порогового значения, то разгрузка приводит к разрыву внутренних связей по наиболее дефектным зонам и диспергированию частиц.

Следовательно, для достижения эффективного диспергирования частиц порошков необходимо обеспечить режим возникновения ударных волн в объеме разрядной камеры при воздействии ВЭР. Как известно, ударная волна возникает, когда скорость фронта волны давления превышает скорость звука в среде.

К сожалению, связь между скоростью фронта волны давления и параметрами ВЭР обработки, особенно при ВЭР в дисперсной системе «порошок – жидкость», в известных работах [2, 5, 9, 10] раскрыта недостаточно. В работе [11] установлено влияние дисперсионной среды, дисперсной фазы и параметров разрядного контура на амплитуду волны давления при ВЭР обработке порошков и показано, что происходит диссипация энергии волны давления на частицах порошка, находящихся во взвешенном состоянии в дисперсионной среде. Поэтому вызывает интерес рассмотреть возможность формирования ударной волны при ВЭР в дисперсной системе «порошок – жидкость» для повышения эффективности диспергирования, ак-

тивации и инициации фазовых переходов в обрабатываемых порошках

В связи с этим, **целью** данной работы является установление условий формирования ударной волны при ВЭР в дисперсной системе «порошок – жидкость».

Методика исследований. Исследования выполнялись в разрядной камере с пьезоэлектрическим волновым датчиком давления (ВДД). Схема разрядного контура соответствует схеме, приведенной в работе [1]. Схема подключения датчика и методика обработки сигналов, поступивших с него, подробно описана в работе [11].

Исследования влияния состава рабочей среды при ВЭР в дисперсной системе «порошок – жидкость» на скорость фронта волны давления выполнялись при условиях, соответствующих условиям, в которых была выполнена работа [11]:

- объем рабочей жидкости 5,5 дм³;
- в качестве рабочей среды использовались дистиллированная вода, дистиллированная вода с добавлением порошка Ti ($d_{cp}=17$ мкм) массой 500 г (массовое соотношение Т:Ж – 1/11), керосин, керосин с добавлением порошка Ti ($d_{cp}=17$ мкм) массой 250 и 500 г (массовое соотношение Т:Ж 1/18 и 1/9 соответственно).

Параметры контура:

- емкость накопителя варьировалась от 0,4 до 1,6 мкФ;
- разрядный промежуток составлял 28 мм для режимов с использованием дистиллированной воды и 12 мм для режимов с использованием керосина.

Рабочее напряжение составляло 50 кВ.

При анализе результатов, приведенных в работе [11], авторами было замечено, что на осциллограммах сигнала ВДД (см. рис. 1) кроме сигнала, соответствующего волне давления (см. рис.1, 1) присутствует также сигнал электрической наводки (см. рис. 1, 2). По форме данный сигнал наводки совпадает с кривой разрядного тока (см. рис. 2, кривая 1).

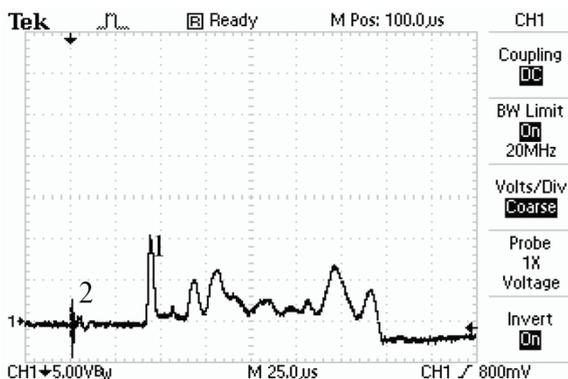


Рисунок 1 – Осциллограмма сигнала ВДД при исследованиях в дистиллированной воде с добавлением порошка Ti, $C=1,6$ мкФ, $L=0,7$ мкГн: 1 – основной пик на осциллограмме сигнала ВДД, соответствующий амплитуде давления; 2 – электрическая наводка, возникающая в момент высоковольтного пробоя рабочей среды

Это позволяет идентифицировать на осциллограмме сигнала ВДД момент времени, соответствующий

возникновению канала ВЭР, что дает возможность оценить по осциллограмме время, за которое волна давления доходит от канала разряда до ВДД. В свою очередь, зная время прохождения волны и расстояние от канала разряда до датчика, возможно определение скорости фронта волны давления:

$$v = r_0/t_e, \quad (1)$$

где r_0 – расстояние от канала разряда до ВДД, м; t_e – время распространения волны давления, с.

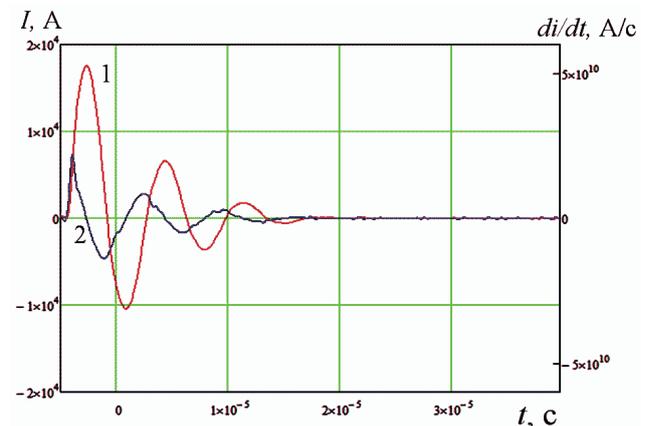


Рисунок 2 – Электрические характеристики ВЭР при исследованиях в дистиллированной воде с добавлением порошка Ti, $C=1,6$ мкФ, $L=0,7$ мкГн: 1 – кривая разрядного тока, 2 – кривая мгновенной скорости нарастания тока

При этом моментом начала отсчета времени распространения волны давления согласно [5] считался момент достижения скоростью нарастания тока в канале разряда максимального значения (см. рис. 2, кривая 2). Тогда:

$$t_e = t_0 - t_m, \quad (2)$$

где t_0 – время, прошедшее между началом процесса ВЭР и появлением сигнала волны давления с датчика, с; t_m – время, прошедшее между началом процесса ВЭР и максимумом скорости нарастания тока в канале разряда, с.

Моментом появления канала разряда считался момент появления электрической наводки на сигнале датчика (см. рис.1, 2).

ВЭР в дисперсных системах является стохастическим процессом и определение точного расстояния между каналом разряда и датчиком для каждого отдельного разряда крайне затруднено. Поэтому обработка результатов исследований проводилась статистическим методом, а в качестве расстояния между каналом разряда и датчиком принималось расстояние между осью симметрии электрода-острия и датчиком, составлявшее 63 мм. Так же, как и в работе [11], каждая экспериментальная точка представляет собой среднее арифметическое значение выборки из не менее, чем 30 разрядов.

Результаты исследований. Анализ изменения скорости фронта волны давления в дистиллированной воде и дистиллированной воде с добавлением порошка Ti (соотношение Т:Ж 1/11) при варьировании емкостью батареи накопителей показывает, что во всем диапазоне исследований значение скорости волны

давления (см. рис. 3) превышает скорость звука в дистиллированной воде ($v=1493$ м/с при н. у.), что свидетельствует о формировании ударных волн. При этом статистическая значимость полученных результатов относительно скорости звука составляет от σ (для режимов с $C=0,4$ мкФ) до 2σ (для ВЭР в дистиллированной воде при $C=1,6$ мкФ). Здесь σ – стандартное отклонение выборки экспериментальных данных, м/с (см. рис. 3, кривые 2 и 4) [10]. Эти результаты свидетельствуют о том, что при ВЭР как в дистиллированной воде, так и в дистиллированной воде с добавлением порошка Ti, в рассмотренных режимах волна давления представляет собой ударную волну. При этом следует учесть, что, согласно данным работы [9], скорость фронта волны давления при ВЭР снижается по мере увеличения расстояния от оси канала разряда, приближаясь к скорости звука в среде. Соответственно, в приканальной области скорость фронта волны давления значительно превышает экспериментально зафиксированные на ВДД значения. Поэтому даже не столь значительное, но статистически значимое экспериментально зафиксированное превышение скоростью фронта волны давления на ВДД скорости звука в среде является свидетельством существования ударных волн в приканальной зоне.

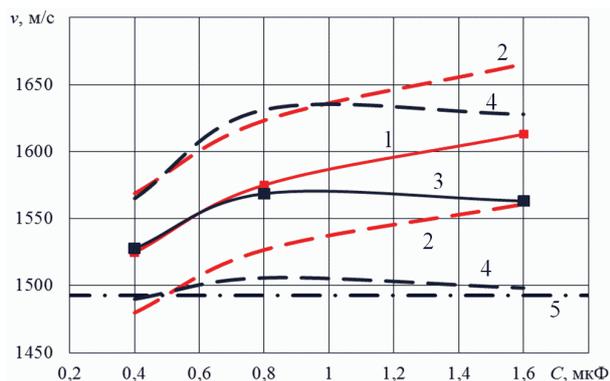


Рисунок 3 – Скорость фронта волны давления при ВЭР с использованием дистиллированной воды в качестве дисперсионной среды: 1 – скорость фронта волны давления при ВЭР в дистиллированной воде; 2 – стандартное отклонение экспериментальных данных при ВЭР в дистиллированной воде; 3 – скорость фронта волны давления при ВЭР в дистиллированной воде с добавлением порошка Ti (соотношение Т:Ж 1/11); 4 – стандартное отклонение экспериментальных данных при ВЭР в дистиллированной воде с добавлением порошка Ti (соотношение Т:Ж 1/11); 5 – скорость звука в дистиллированной воде

Анализ закономерности изменения скорости фронта волны давления при ВЭР в дистиллированной воде (см. рис. 3, кривая 1) показывает, что при увеличении емкости накопителя в рассмотренном диапазоне скорость фронта волны давления возрастает с 1525 м/с при $C=0,4$ мкФ до 1613 м/с при $C=1,6$ мкФ. Стандартное отклонение экспериментальных данных при этом практически не изменяется. Добавление в дистиллят порошка Ti в режимах с $C=0,4$ мкФ и $C=0,8$ мкФ не приводит к значимому изменению скорости фронта волны давления (см. рис. 3, кривая 3).

При этом в режиме с $C=0,8$ мкФ происходит не-

значительное увеличение стандартного отклонения экспериментальных данных, что свидетельствует о увеличении разброса геометрических положений канала разряда в объеме разрядной камеры. В отличие от ВЭР в дистилляте, повышение емкости накопителя до $C=1,6$ мкФ не приводит к увеличению скорости фронта волны давления (см. рис. 3, кривые 1 и 3). При этом согласно данным, приведенным в [11], экспериментально регистрируемая ВДД амплитуда волны давления в данном режиме (111 МПа) превышает амплитуду волны давления в режимах с $C=0,4$ и $0,8$ мкФ (30 и 70 МПа соответственно).

Возможным объяснением этого может служить то, что при повышении энергии единичного разряда повышается мощность гидротоков [2], что приводит к увеличению концентрации твердой фазы в экваториальной плоскости канала разряда, находящейся во взвешенном в дисперсионной среде состоянии. Согласно [13, 14], при взаимодействии фронта ударной волны с дисперсной фазой происходит существенное снижение его скорости при незначительном снижении амплитуды.

Результаты экспериментальных исследований скорости фронта волны давления при ВЭР в керосине и в керосине с добавлением порошка Ti (соотношение Т:Ж 1/18) (см. рис. 4) существенно отличаются от случая ВЭР с использованием дистиллированной воды в качестве дисперсионной среды. При ВЭР в керосине в режимах с $C=0,4$ и $0,8$ мкФ скорость фронта волны давления в пределах погрешности совпадает со значением скорости звука в керосине ($v=1330$ м/с при н. у.). Однако стандартное отклонение экспериментальных данных достаточно велико (65 м/с), что позволяет предположить существование ударной волны в приканальной зоне при отдельных разрядах из серии.

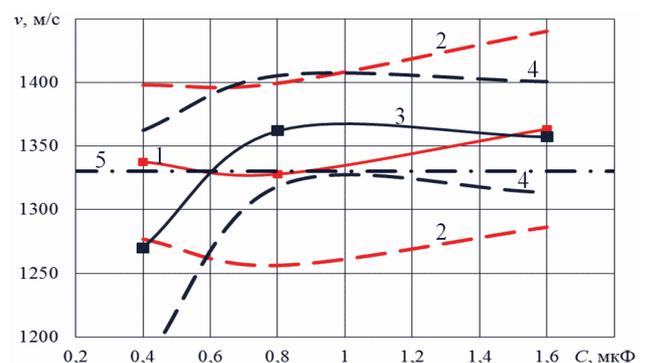


Рисунок 4 – Скорость фронта волны давления при ВЭР с использованием керосина в качестве дисперсионной среды: 1 – скорость фронта волны давления при ВЭР в керосине; 2 – стандартное отклонение экспериментальных данных при ВЭР в керосине; 3 – скорость фронта волны давления при ВЭР в керосине с добавлением порошка Ti (соотношение Т:Ж 1/18); 4 – стандартное отклонение экспериментальных данных при ВЭР в керосине с добавлением порошка Ti (соотношение Т:Ж 1/18); 5 – скорость звука в керосине

Увеличение емкости накопителя до 1,6 мкФ приводит к увеличению среднего значения скорости фронта волны давления до 1363 м/с, при этом значение стандартного отклонения сохраняется. Статисти-

ческая значимость этого результата относительно скорости звука составляет $0,6\sigma$. Это свидетельствует о том, что вероятность формирования ударных волн в данном режиме повышается, однако ударные волны формируются не в каждом разряде из серии. Таким образом, изменение состава дисперсионной среды с дистиллированной воды на керосин приводит к необходимости снижения величины межэлектродного промежутка с 28 до 12 мм, что в свою очередь приводит к снижению как амплитуды [11], так и скорости фронта волны давления.

Добавление в керосин порошка Ti (соотношение Т:Ж 1/18) приводит к снижению скорости фронта волны давления в режиме с $C=0,4$ мкФ до 1270 м/с (см. рис. 4, кривая 3), что меньше скорости звука в керосине. Повышение емкости накопителя до 0,8 мкФ позволило повысить скорость фронта волны давления до 1360 м/с. Статистическая значимость этого результата относительно скорости звука составляет $0,7\sigma$. Это позволяет предположить существование ударных волн при значимой доле разрядов (более 50 %). Повышение емкости накопителя до 1,6 мкФ не приводит к существенным изменениям экспериментально регистрируемой скорости фронта волны давления. При этом согласно результатам, приведенным в работе [11], амплитуда давления на ВДД в данном режиме возрастает с 10 до 13 МПа, что подтверждает предположение о взаимодействии фронта волны давления со взвешенными в дисперсионной среде частицами дисперсной фазы.

При добавлении порошка Ti в дистиллированную воду значение стандартного отклонения выборки (см. 3, кривые 4) возрастает относительно стандартного отклонения выборки, соответствующей исследованиям скорости фронта волны давления при ВЭР в дистиллате (см. рис. 3, кривые 2). Однако добавление порошка Ti в керосин приводит наоборот, к снижению значения стандартного отклонения (см. рис. 4, кривые 4 и 2). Из этого можно сделать вывод, что при значении межэлектродного промежутка 28 мм наличие находящихся во взвешенном состоянии дисперсных частиц увеличивает разброс геометрических положений канала разряда, тогда как при разрядном промежутке 12 мм частицы наоборот, стабилизируют разряд.

Исследования изменения скорости фронта волны давления в процессе обработки (см. рис. 5) при добавлении в керосин порошка Ti (соотношение Т:Ж 1/9) показывают, что в результате увеличения количества дисперсных частиц обрабатываемого порошка и синтезируемого нанопорошка скорость фронта волны давления снижается с 1366 м/с при 50 разрядах до 1311 м/с при 100 разрядах.

Согласно данным, приведенным в [11], при этом снижается и экспериментально регистрируемая амплитуда давления. Снижение количества дисперсных частиц, находящихся во взвешенном состоянии в дисперсионной среде, путем организации паузы на 2 часа, приводит к восстановлению значения экспериментально регистрируемой скорости фронта волны давления. Несмотря на то, что снижение количества твердой фазы в 2 раза (до соотношения Т:Ж 1/18) приво-

дит к повышению амплитуды давления волны сжатия [11], скорость ее фронта не изменяется.

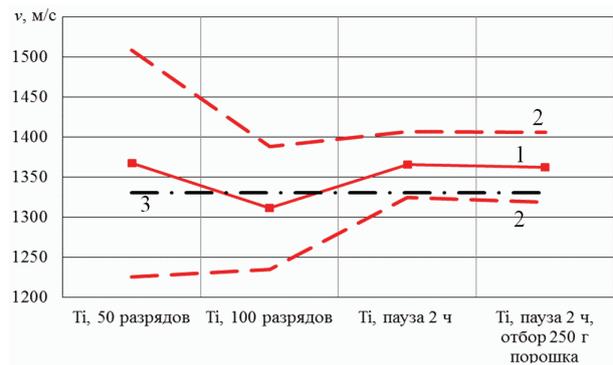


Рисунок 5 – Скорость фронта волны давления при ВЭР в керосине с добавлением порошка Ti: 1 – скорость фронта волны давления; 2 – стандартное отклонение экспериментальных данных; 3 – скорость звука в керосине

Снижение скорости выделения энергии в канале разряда путем увеличения индуктивности разрядного контура в $\sim 3,3$ раза с 0,83 до 2,76 мкГн приводит к снижению скорости фронта волны давления с 1328 до 1283 м/с (см. рис. 6). При этом стандартное отклонение экспериментальных данных значительно увеличилось (с 72 до 127 м/с), что свидетельствует об увеличении разброса геометрического положения канала разряда. Таким образом, снижение скорости выделения энергии в канале разряда снижает не только амплитуду волны давления [11], но и скорость ее фронта. Это свидетельствует о том, что одним из условий формирования ударной волны при ВЭР в дисперсной системе «керосин – порошок» является обеспечение индуктивности разрядного контура не более 0,9 мкГн.

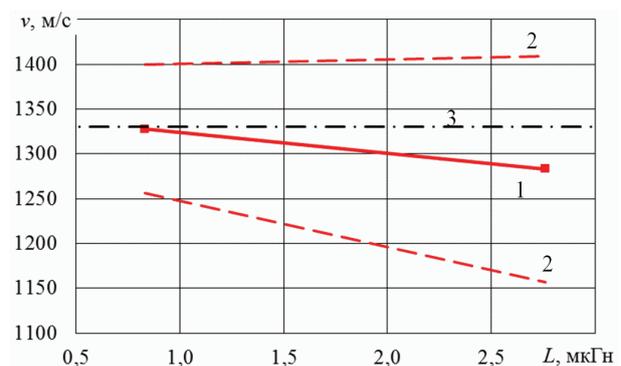


Рисунок 6 – Скорость фронта волны давления при ВЭР в керосине при $C=0,8$ мкФ: 1 – скорость фронта волны давления; 2 – стандартное отклонение экспериментальных данных; 3 – скорость звука в керосине

Выводы. Экспериментально установлены условия формирования ударной волны при ВЭР в дисперсной системе «порошок – жидкость» и связь скорости фронта волны давления при ВЭР в дисперсной системе «порошок – жидкость» с дисперсионной средой, количеством дисперсной фазы и параметрами разрядного контура. Условием формирования ударных волн при ВЭР в керосине с добавлением порошка Ti концентрацией 1/9 и 1/18 при $U=50$ кВ является

обеспечение емкости батареи накопителей не менее 0,8 мкФ и индуктивности разрядного контура не более 0,9 мкГн. Установлено существование ударных волн при ВЭР в дистиллате и в дистиллате с добавлением порошка Ti концентрацией 1/11 во всех рассмотренных режимах при $U=50$ кВ и емкости накопителя от 0,4 до 1,6 мкФ.

Список литературы. 1. Sizonenko O. N. Variation in the Particle Size of Fe-Ti-B₄C Powders Induced by High-voltage Electrical Discharge / O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, A. I. Raichenko [et al.] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2012. – Vol. 51, Iss. 3. – P. 129–136. 2. Гулий, Г. А. Научные основы разрядно-импульсных технологий / Г. А. Гулий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 3. Sizonenko, O. Plasma technologies for obtainment of composite materials dispersion hardened by nanostructured particles / O. Sizonenko, V. Tregub, N. Pristash et al. // International virtual journal for science, technics and innovations for the industry. – ISSN 1313 0226, Year IX Issue 1/2015. – P. 32–35. 4. Sizonenko O. N. Dispersion and Carburization of Titanium Powders by Electric Discharge / O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, E. I. Taftai et al. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2013. – Vol. 52, Iss. 5-6. – P. 247–253. 5. Наугольных, К. А. Электрические разряды в воде / К. А. Наугольных, Н. А. Рой. – М.: Наука, 1971. – 155 с. 6. Юшко, К. Б. Изменение показателя преломления жидкостей при сжатии ударной волны. Аномальные оптические свойства четыреххлористого углерода / К. Б. Юшко, Г. В. Кришкевич, С. Б. Кормер // Письма в ЖЭТФ. – 1968. – Т. 7, № 1. – С. 12. 7. Клименко, В. Ю. Структура фронта ударной волны в жидкости / В. Ю. Клименко, А. Н. Дремин // Доклады академии наук СССР. – 1979. – Т. 249, № 4. – С. 840–843. 8. Бацанов, С. С. Химические реакции под действием ударного сжатия / С. С. Бацанов // Сборник «Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах». – Черногловка, 1978. 9. Ахметов, М. Н. О скорости фронта ударной волны при высоковольтном электрическом разряде в воде / М. Н. Ахметов, Н. Д. Ахметов, М. М. Гимадаев, В. А. Кривошеев // Прикладная физика. – 2015. – № 6. – С. 54–56. 10. Малюшевский, П. П. Основы разрядно-импульсной технологии / П. П. Малюшевский. – К.: Наукова думка, 1983. – 268 с. 11. Торпак, А. С. Влияние состава рабочей среды на амплитуду волны давления высоковольтного электрического разряда / А. С. Торпак, О. Н. Сизоненко, Е. М. Шерегий, С. В. Прохоренко, Э. И. Тафтай // Вестник НТУ «ХПИ». Серия «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Х.: 2015. – № 20 (1129). – С. 138–148. 12. Vaughan, S. Scien-

tific Inference: Learning from Data (1st ed.) / S. Vaughan. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013. – P. 146–152. ISBN 1-107-02482-X. 13. Chang, E. J. Shock wave interactions with particles and liquid fuel droplets / E. J. Chang, K. Kailasanath // Shock Waves. – 2003. – № 12. – P. 333–341. 14. Суров, В. С. Взаимодействие ударной волны с пузырьковым экраном / В. С. Суров // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69, вып. 1. – С. 42–48.

Bibliography (transliterated): 1. Sizonenko, O. N. et al. "Variation in the Particle Size of Fe-Ti-B₄C Powders Induced by High-voltage Electrical Discharge. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Vol. 51, Iss. 3. 2012. pp. 129–136. 2. Gulyj G. A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij. Kiev: Naukova dumka, 1990. Print. 3. Sizonenko, O. et al. Plasma technologies for obtainment of composite materials dispersion hardened by nanostructured particles. International virtual journal for science, technics and innovations for the industry. Year IX, Issue 1/2015. 2015. pp. 32–35. 4. Sizonenko, O. N. et al. Dispersion and Carburization of Titanium Powders by Electric Discharge. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Vol. 52, Iss. 5-6. 2013. pp. 247–253. 5. Naugolnyh, K. A. Elektricheskie razryady v vode. Moscow: Nauka, 1971. 6. Yushko, K. B., G. V. Krishkevich and S. B. Kormer. Izmenenie pokazatelya prelomleniya zhidkostey pri szhatii udarnoy volnoj. Anomalnye opticheskie svoystva chetyrehhloristogo ugleroda. Pisma v ZhETF. Vol. 7, No. 1. 1968. 12. p. 7. Klimentko, V. Yu. and A. N. Dremin. Struktura fronta udarnoy volny v zhidkosti. Doklady akademii nauk SSSR. Vol. 249, No. 4. 1979. pp. 840–843. 8. Batsanov, S. S. Himicheskie reaktsii pod deystviem udarnogo szhatiya. Sbornik Detonatsiya. Kriticheskie yavleniya. Fiziko-himicheskie prevrascheniya v udarnykh volnah. Chernogolovka, 1978. 9. Ahmetov, M. N. et. al. O skorosti fronta udarnoy volny pri vysokovoltnom elektricheskom razryade v vode. Prikladnaya fizika. No. 6. 2015. pp. 54–56. 10. Malyushevskij, P. P. Osnovy razrjadno-impul'snoj tehnologii. Naukova dumka, 1983. 11. Torpakov, A. S. et. al. Vlijanie sostava rabochej sredy na amplitudu volny davlenija vysokovol'tnogo elektricheskogo razryada. Vestnik NTU «KhPI». No 20 (1129). 2015. pp. 138–148. 12. Vaughan, S. Scientific Inference: Learning from Data (1st ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2013. pp. 146–152. ISBN 1-107-02482-X. 13. Chang, E. J. and K. Kailasanath. Shock wave interactions with particles and liquid fuel droplets. Shock Waves. No. 12. 2003. pp. 333–341. 14. Surov, V. S. «Vzaimodejstviye udarnoy volny s puzyr'kovym ekranom» Zhurnal tehnichejskoj fiziki. Vol. 69, iss. 1. 1999. pp. 42–48.

Поступила (received) 26.02.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Торпак Андрей Сергеевич – младший научный сотрудник; Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины, г. Николаев, тел.: (093) 846-93-58; e-mail: torpakov@gmail.com.

Torpakov Andriy Serhiyovych – Research Assistant; Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv, tel.: (093) 846-93-58; e-mail: torpakov@gmail.com.

Сизоненко Ольга Николаевна – ведущий научный сотрудник; доктор технических наук, профессор, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины, г. Николаев, тел.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

Syzonenko Olga Mykolayivna – Leading Researcher; Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv, tel.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

Тафтай Эдуард Иванович – младший научный сотрудник; Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины, г. Николаев, тел.: (0512) 58-71-43; e-mail: dioo@iipt.com.ua.

Taftai Eduard Ivanovych – Research Assistant; Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv, tel.: (0512) 58-71-43; e-mail: dioo@iipt.com.ua.

УДК 537.528

С. А. ХАЙНАЦКИЙ

НЕКОТОРЫЕ ИНВАРИАНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ В ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ

Получены некоторые инварианты электрического взрыва проводников в оптимальных режимах, когда вся запасенная энергия выделяется в первом полупериоде. Показано, что в оптимальных режимах ряд соотношений – отношение запасенной энергии к массе проводника, к энергии сублимации, отношение волнового сопротивления разрядного контура и начального омического сопротивления проводника, не зависят от параметров контура и размеров проводников. Определено среднее значение отношения начального напряжения к длине проводника, зависящее только от собственной частоты разрядного контура. Установлены границы применимости модели однофазного взрыва проводников.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, оптимальный режим, инварианты подобия, электроразрядный контур.

Введение. Электрический взрыв проводников (ЭВП) является одним из важных инструментов получения композитных наноматериалов [1, 2], широко применяется также в ряде других технологических процессов. Актуальными являются вопросы изучения особенностей взрыва в различных диапазонах параметров, особенностей механизма разрушения проводников под действием импульсных токов, границ применимости различных моделей. Особый интерес представляет ЭВП в оптимальных режимах, когда вся запасенная энергия выделяется в первом полупериоде разряда. В этих режимах скорость выделения энергии в канале разряда максимальна, что безусловно сказывается как на параметрах генерируемой при ЭВП ударной волны, так и на размерах получаемых при взрыве наночастиц.

Целью работы является поиск величин (отношений, выражений), характеризующих особенности ЭВП в оптимальных режимах и не зависящих от электротехнических параметров энергоисточника и размеров проводника, то есть являющихся инвариантами при их изменении.

Условия оптимальности ЭВП были получены в [3] с использованием экспериментально определенных критериев подобия (инвариантов подобия) электрических характеристик взрыва проводников

$$\begin{cases} \Pi_1 = (R_c + R_{w0}) \cdot \sqrt{C/L}, \\ \Pi_2 = \frac{1}{S^2 \gamma_0 \sigma_0 (\lambda_m + \lambda_b)} \cdot \frac{C^{3/2} U_0^2}{L^{1/2}}, \\ \Pi_3 = \frac{A l^2}{U_0^2 \sqrt{LC}} \end{cases} \quad (1)$$

из требования максимума мощности. Здесь R_c и R_{w0} – сопротивление разрядного контура и начальное сопротивление проводника. γ_0 – плотность, σ_0 – удельная электропроводность, λ_m и λ_b – удельные теплоты плавления и испарения материала проводника – характеризуют индивидуальные свойства металла проводника. S – площадь сечения проводника, $A = 10^4$ (В²·с)/м² – искровая постоянная, не зависящая от материала проводника. Электротехнические параметры энергоисточника C – емкость конденсаторной батареи, L – индуктивность разрядного контура, U_0 – начальное напряжение, вместе с геометрическими

параметрами проводника (для цилиндрического проводника это длина и диаметр), «отвечают» за режим разряда. Выражения для оптимального диаметра d_{opt} и длины проводника l_{opt} имеют вид [3]

$$d_{opt} = 2 \left[\frac{W_0}{z \gamma_0 \sigma_0 (\lambda_m + \lambda_b)} \right]^{1/4}; \quad (2)$$

$$l_{opt} = 2 \cdot (10^2 A)^{-1/2} U_0 \sqrt{LC}, \quad (3)$$

где $W_0 = C U_0^2 / 2$ – запасенная в конденсаторной батарее энергия, $z = \sqrt{L/C}$ – волновое сопротивление.

Используя эти выражения и результаты собственных экспериментальных данных, ранее мы получили некоторые соотношения, определяющие другие (кроме максимума мощности) особенности оптимального режима взрыва проводников [4, 5]. Оказалось, что некоторые важные для исследования ЭВП размерные соотношения при взрыве в оптимальном режиме являются инвариантами по отношению к параметрам разрядного контура и размерам проводников. Например, отношение запасенной энергии к массе проводника, широко применяющееся для анализа экспериментальных данных и классификации режимов взрыва еще с самого начала активного исследования процесса ЭВП [6], зависит только от свойств металла проводника

$$\left(\frac{W_0}{m} \right)_{opt}^l = \sqrt{10^2 A} \cdot \left[\frac{\sigma_0 \cdot (\lambda_m + \lambda_b)}{8 \pi^2 \gamma_0} \right]^{1/2} \quad (4)$$

и, соответственно, инвариантно по отношению к параметрам контура и размерам проводника. Аналогичным инвариантом является отношение запасенной энергии к энергии сублимации – энергии, необходимой для полного испарения проводника

$$\left. \frac{W_0}{W_s} \right|_{opt}^l = 10 \sqrt{\frac{A \sigma_0}{8 \pi^2 \gamma_0}} \cdot \left[\frac{(\lambda_m + \lambda_b)^{1/2}}{c_p (T_b - T_0) + (\lambda_m + \lambda_b)} \right]. \quad (5)$$

Здесь c_p – теплоемкость металла, T_b – температура кипения. Верхний индекс l означает, что выражения (4-5), как, собственно, и (1-3), относятся к ЭВП в жидкости. Это требуется уточнить, поскольку в [5] показано, что подобные соотношения, полученные для ЭВП в газах, несколько отличаются.

Естественно предположить, что и безразмерные критерии Π_1 , Π_2 и Π_3 [3] в оптимальных режимах

взрыва по своей сути должны быть инвариантами. Для первого критерия $\Pi_1 = \frac{R_c}{z} + \frac{R_{w0}}{z}$ инвариантным (одинаковым для всех оптимальных режимов ЭВП) может являться только второе слагаемое – отношение начального сопротивления проводника к «волновому» сопротивлению. Действительно, несложные вычисления приводят к выражению

$$\frac{z}{R_{w0}} \cong \pi^2 \frac{W_0}{W_s}. \quad (6)$$

При вычислениях мы пренебрегли в (5) слагаемым $c_p(T_b - T_0)$, поскольку $c_p(T_b - T_0) \ll (\lambda_m + \lambda_b)$. Таким образом, учитывая (5), из (6) следует, что отношение z/R_{w0} равно для всех оптимальных режимов, если проводники из одинакового металла, а также всегда $z > R_{w0}$, а для металлов I группы [4,6] $z \gg R_{w0}$. В случаях, когда $R_{w0} \ll R_c$, значения критерия Π_1 определяются величиной сопротивления цепи, емкостью конденсаторной батареи и индуктивностью контура.

Что касается критериев Π_2 и Π_3 , то в оптимальных режимах их значения не зависят также и от свойств металла проводника. Для всех металлов расчет для Π_2 дает значение $\Pi_2 = 2/\pi^2 \approx 0,2$, а Π_3 равно $\Pi_3 = 4 \cdot 10^{-2}$.

Некоторые соотношения не являются в полной мере инвариантными по отношению к параметрам и размерам проводника, но наличие таких выражений упрощает анализ процесса взрыва с их помощью. Так, например, из (4) следует, что отношение W_0/V_{opt} , где V_{opt} – объем проводника при взрыве в оптимальных режимах, также является инвариантом:

$$\left(\frac{W_0}{V}\right)_{opt}^l = \sqrt{10^2 A} \cdot \left[\frac{\sigma_0 \gamma_0 \cdot (\lambda_m + \lambda_b)}{8\pi^2}\right]^{1/2}.$$

Соответственно, объем равен

$$V_{opt} = 0,4 \frac{\pi W_0}{\sqrt{A}} [2\gamma_0 \sigma_0 (\lambda_m + \lambda_b)]^{-1/2}, \quad (7)$$

то есть при одинаковой запасенной энергии также не зависит ни от размеров проводника, ни от параметров разрядного контура.

Большой интерес представляет отношение начального напряжения U_0 к длине проводника l , – его влияние на характер взрыва проводников отмечается в [7]. Считается, что это некоторая «напряженность электрического поля», величина которой определяет взрывной/невзрывной характер развития процессов в проводнике. Для оптимальных режимов это отношение можно записать в виде

$$\frac{U_0}{l_{opt}} = \frac{U_0}{2(10^2 A)^{-1/2} \sqrt{LC}} = \frac{5A^{1/2}}{(LC)^{1/4}}. \quad (8)$$

откуда следует, что оно зависит только от временного параметра, поскольку $T = 2\pi\sqrt{LC}$ – период собственных колебаний контура. Такая особенность отношения U_0/l_{opt} позволяет его использовать для исследования границ применимости представлений о механизме разрушения проводников при ЭВП в оптимальных режимах.

Для проводников из различных металлов (для

каждого из них), относящихся, как правило, к первой группе по классификации [4, 6], можно отыскать множество режимов с оптимальными параметрами. При этом остается открытым вопрос о границах применимости приведенных выше соотношений. Поскольку из их вида явно не следует, что такие границы существуют, необходимо для их нахождения привлечь какие-то другие соображения. В работе [3] просто вводится примерный диапазон времени до наступления первого максимума тока, установленный экспериментально для медных и алюминиевых проводников, в рамках которого можно корректно использовать соотношения (1), на которых основаны все наши расчеты. Но, как известно, существуют реальные физические процессы, отвечающие за разрушение проводников в процессе электрического взрыва, которые реализуются в определенных временных рамках, связанных со скоростью энерговода. Наиболее известные из них – это магнитогидродинамические (МГД) неустойчивости, тепловые объемные процессы и процессы, развивающиеся неоднородно по сечению – с поверхности проводника.

Условия смены механизма взрыва (с МГД на тепловой) определены в [8] из достаточно простых соображений. Из того, что инкременты неустойчивостей зависят от плотности тока линейно, а энергия, вводимая в проводник, квадратично, можно заключить, что роль МГД неустойчивостей с ростом плотности тока будет уменьшаться и, в конце концов, главным обстоятельством, определяющим поведение проводника, станут тепловые процессы. Плотность тока, при достижении которой такое изменение должно проявиться, в работе оценили, приняв, что удельная энергия, необходимая для полного испарения проводника, вводится за время развития неустойчивости. Полагая для оценки плотность тока постоянной j_0 , удельное сопротивление металла также постоянным и равным удельному сопротивлению жидкого проводника при температуре плавления, для медного проводника в [8] получено значение критической плотности тока $j_{max} \approx 2,5 \cdot 10^{11}$ А/м². Если учесть влияние принятых в работе допущений на величину j_{max} , было бы правильнее считать $2,5 \cdot 10^{11}$ А/м² $\geq j_{max} \geq 2 \cdot 10^{11}$ А/м². При плотности тока, большей j_{max} , медный проводник будет разрушаться за счет однородных по сечению тепловых процессов, при меньшей будут возникать зоны неоднородного (по оси) распределения тока и температуры, которые приведут к разрушению проводника в этих местах неоднородности.

Учитывая это обстоятельство, попробуем оценить значение отношения U_0/l_{opt} , рассмотренное выше, на «нижней» (по скорости ввода энергии) границе однородного взрыва проводников. МГД-неустойчивости в конденсированном проводнике изучены достаточно хорошо, поэтому произвести оценки однородности осевого распределения электрических характеристик проводника не представляет труда. Самой опасной модой МГД-неустойчивости является неустойчивость моды $m = 0$, соответствующая перетяжкам. Перетяжки приводят к неоднородности осевого распределения плотности тока и к осевой неоднородности температуры проводника из-за неодина-

ковой степени нагрева разных частей проводника.

Инкремент неустойчивости моды $m = 0$ можно оценить выражением [9]

$$\tau_{MHD}^{(m=0)} = \begin{cases} t_A^{4/5} \cdot t_H^{1/5}, & t_H \gg t_A; \\ t_A, & t_H \leq t_A. \end{cases} \quad (9)$$

Здесь введены следующие обозначения: $t_H = \mu_0 \sigma_w r_w^2$ – магнитное диффузионное время, определяющее установление однородного распределения тока в проводнике с постоянной проводимостью;

$t_A = r_w / v_A$, где $v_A = \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\gamma_l} H}$ – скорость распространения волны Альфвена, соответственно, t_A – время распространения альфвеновской волны в проводнике радиуса r_w . Здесь μ_0 – относительная магнитная проницаемость, γ_l – плотность жидкого металла.

Если считать, что неустойчивость может развиваться лишь на максимальном токе, то магнитное поле оценивается выражением $H = H_{\max} = \frac{I_{\max}}{2\pi r_w}$, где радиус r_w должен соответствовать его начальному значению в жидкой фазе проводника (после плавления). Для альфвеновского времени получим выражение

$$t_A = \frac{2\pi r_w^2}{I_{\max} \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\gamma_l}}} = \frac{2}{j_{\max} \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\gamma_l}}}, \quad \text{где } j_{\max} = \frac{I_{\max}}{\pi r_w^2} \text{ – плотность тока в максимуме.}$$

Оценка t_H и t_A для медного проводника дает значения $t_H \sim 10^{-7}$ с, $t_A \sim 10^{-6}$ с, откуда следует, что реализуется неравенство $t_H \ll t_A$, поэтому окончательно для постоянной времени МГД-неустойчивости моды $m = 0$ имеем:

$$\tau_{MHD}^{(m=0)} = t_A = \frac{2}{j_{\max} \sqrt{\mu \mu_0 / \gamma_l}}. \quad (10)$$

Поскольку неустойчивость моды $m = 0$ может развиваться только в жидком проводнике, в качестве некоторого «характерного» времени процесса выберем время нахождения проводника в жидком состоянии $t_l = T/n$, где T – период собственных колебаний контура, а $1/n$ характеризует долю времени от момента плавления до вскипания проводника. Для того, чтобы в процессе разрушения проводника преобладали тепловые процессы, естественно потребовать

$$t_l \leq \tau_{MHD}^{(m=0)}. \quad (11)$$

Учитывая, что из (8) $\sqrt{LC} = 25A \left(\frac{l_{opt}}{U_0} \right)^2$, а

$$t_l = \frac{2\pi \sqrt{LC}}{n}, \quad \text{несложно условие (11) привести к виду}$$

$$\frac{U_0}{l_{opt}} \geq 5 \left(\frac{\pi A j_{\max} \sqrt{\mu \mu_0 / \gamma_l}}{n} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

Для медного проводника «критическая» плотность тока по оценкам, приведенным выше, $j_{\max} \cong 2 \div 2,5 \cdot 10^{11}$ А/м², для неферромагнитных материалов $\mu = 1$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, $\gamma_l = 8,27 \cdot 10^3$ кг/м³. Время нахо-

ждения проводника в жидком состоянии t_l можно определить только экспериментальным путем, из осциллограмм напряжения. Например, оптимальные размеры медного проводника при электротехнических параметрах энергоисточника $U_0 = 20 \cdot 10^3$ В, $L = 4,8 \cdot 10^{-6}$ Гн, $C = 6 \cdot 10^{-6}$ Ф равны $d_{opt} = 2,996 \cdot 10^{-4}$ м, $l_{opt} = 0,093$ м. При выборе проводника с размерами, равными $d = 3 \cdot 10^{-4}$ м и $l = 0,093$ м и тех же параметрах контура мы получаем ЭВП в оптимальном режиме. По осциллограммам напряжения [3] определяем $t_l \cong 0,56 \cdot 10^{-6}$ с. Период контура при этом равен $33,72 \cdot 10^{-6}$ с, поэтому $n = 60,21$. Погрешность измерений не превышает 10%, поэтому можно принять $n = 60 \pm 6$. Расчет отношения U_0/l_{opt} по (12) дает значение $U_0/l_{opt} \geq 2,01 \cdot 10^5$ В/м. Экспериментальное значение этого отношения для выбранного режима при $U_0 = 20 \cdot 10^3$ В и $l_{opt} = 0,093$ м будет равно $2,16 \cdot 10^5$ В/м – т.е. неравенство (12) выполняется «на пределе». Тем не менее, проводник с такими оптимальными параметрами при взрыве разрушается однородно, за счет тепловых процессов, происходящих в его объеме.

Для сравнения возьмем еще один режим взрыва с параметрами контура $U_0 = 40 \cdot 10^3$ В, $L = 2,85 \cdot 10^{-6}$ Гн, $C = 6 \cdot 10^{-6}$ Ф, диаметром проводника $d = 4 \cdot 10^{-4}$ м и длиной $l = 0,165$ м. Этот режим взрыва также близок к оптимальному. Время t_l для него, определенное по осциллограммам [3], $t_l \cong 0,46 \cdot 10^{-6}$ с, период контура $T = 26 \cdot 10^{-6}$ с, соответственно, $n = 56,5$. Отношение $U_0/l = 2,46 \cdot 10^5$ В/м – неравенство (12) выполняется хорошо. Проверка значения n по другим экспериментальным результатам для медных проводников также дает очень близкий результат, и это не удивительно, поскольку зависимости напряжения и тока от времени в безразмерных («приведенных») координатах при ЭВП в оптимальных режимах практически ложатся на одну кривую ввиду подобия и высокой степени повторяемости экспериментальных результатов [3]. Соответственно, совпадают и отношения T/t_l .

Из приведенных оценок хорошо просматривается смысл полученных соотношений. Из (8) и (12) следует, что при уменьшении собственной частоты разрядного контура за счет увеличения его индуктивности или емкости конденсаторной батареи, несмотря на то, что параметры формально будут оптимальными, мы можем попасть в область их значений (при $U_0/l < 2 \cdot 10^5$ В/м), в которой соотношения (1) – (3) выполняется некорректно. При этом вид осциллограммы тока и напряжения может быть похожим на получаемые при взрыве в оптимальном режиме, но проводник будет разрушаться не за счет тепловых процессов и неоднородно вдоль оси.

Условие (12) позволяет также установить граничное значение отношения длины проводника к его диаметру. Максимальный ток в проводнике до начала его испарения приблизительно равен $I_{\max} = U_0 \sqrt{C/L}$. Полагая, как и выше, что время развития МГД-неустойчивости равно альфвеновскому времени, из

$$t_A = r_w / v_A, \quad v_A = \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\gamma_l} H} \quad \text{и} \quad H = H_{\max} = \frac{I_{\max}}{2\pi r_w}, \quad \text{ис-}$$

пользуя (8) и условие $t_l \leq \tau_{MHD}^{(m=0)}$, получим

$$\frac{\pi}{2n} 100A \left(\frac{l_{opt}}{U_0} \right)^2 \leq 2 \frac{\pi r_w^2}{U_0 \sqrt{\mu\mu_0/\gamma_l}} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (13)$$

Применяя для оптимальных режимов $r_w = r_{opt}$, преобразуем (13) к виду

$$\frac{l_{opt}}{d_{opt}} \leq 0,1 \sqrt{\frac{nU_0 \sqrt{L/C}}{A \sqrt{\mu\mu_0/\gamma_l}}}. \quad (14)$$

Соотношение (14) определяет «допустимое» значение отношения длины проводника к диаметру в оптимальном режиме взрыва, выше которого разрушение проводника происходит неоднородно. К сожалению, отношение (14) включает в себя параметры разрядного контура, поэтому не может носить универсального характера. Но опираясь на тот факт, что значения отношения (12) для первого режима разряда, рассчитанные по формуле и взятые из эксперимента, практически совпадают, в качестве граничного значения можно принять $l_{opt}/d_{opt} \approx 300$, получаемое из расчета и экспериментально.

При еще большем увеличении скорости ввода энергии в проводник однородность распределения поля и, соответственно, тока в проводнике при определенных условиях может нарушаться, что приводит к локализации фазовой неоднородности проводника вблизи его поверхности. Разрушение проводника при взрыве будет по-прежнему связано с тепловыми процессами, но происходить будет неоднородно по сечению. Поскольку поле проникает в проводник на глубину

$$\delta = \frac{2}{\sqrt{2\omega\sigma_0\mu\mu_0}}, \quad (15)$$

для того, чтобы исключить влияния поверхностных эффектов, достаточно потребовать

$$r_w/\delta \leq 1, \text{ или } r_w \leq \delta. \quad (16)$$

Здесь ω – частота, $\omega = 1/\sqrt{LC}$; σ_0 – начальная электропроводность, δ – толщина скин-слоя. С учетом (8) и (15), условие (16) легко преобразуется к виду

$$\frac{U_0}{l_{opt}} \leq \frac{10}{r_w} \sqrt{\frac{A}{2\sigma_0\mu\mu_0}}, \quad (17)$$

или же для оптимальных режимов

$$\frac{U_0}{l_{opt}} \leq \frac{10}{d_{opt}} \sqrt{\frac{2A}{\sigma_0\mu\mu_0}}. \quad (18)$$

Для отношения l_{opt}/d_{opt} отсюда также несложно получить

$$\frac{l_{opt}}{d_{opt}} \geq 0,1 U_0 \sqrt{\frac{\sigma_0\mu\mu_0}{2A}}. \quad (19)$$

При расчете отношения U_0/l_{opt} по (18) для режима с $U_0 = 20$ кВ значение U_0/l_{opt} превышает экспериментальное значение более чем вдвое ($5,45 \cdot 10^5$ В/м и $2,16 \cdot 10^5$ В/м соответственно), что свидетельствует о том, что нарушения однородности радиального распределения тока в проводнике нет. Отношение l_{opt}/d_{opt} во столько же раз меньше ($122,57 \text{ м}^{-1}$ и $309,25 \text{ м}^{-1}$). В режиме с $U_0 = 40$ кВ отношение $U_0/l_{opt} = 3,61 \cdot 10^5$ В/м

при экспериментальном значении $2,46 \cdot 10^5$ В/м, отношение длины проводника к диаметру дает значение $245,13 \text{ м}^{-1}$ при $(l_{opt}/d_{opt})_{exp} = 359,68 \text{ м}^{-1}$, то есть неравенство выполняется для обоих рассмотренных режимов строго.

Для определения граничных величин отношений (18) и (19) рассчитаем их в широком диапазоне параметров. Начальное напряжение будем изменять от 10 до 50 кВ, емкость от 0,1 до 12 мкФ, индуктивность от 0,1 до 12 мкГн. При $U_0 = 50$ кВ уменьшение произведения LC от $144 \cdot 10^{-12}$ до $2,5 \cdot 10^{-13} \text{ с}^2$ приводит к нарушению неравенств при значениях $U_0/l_{opt} \approx 7 \cdot 10^5$ В/м, причем с определенных значений LC отношение l_{opt}/d_{opt} «стабилизируется» на величине $l_{opt}/d_{opt} \approx 300 \text{ м}^{-1}$. При этом на более низких напряжениях неравенства (18) - (19) выполняются, но значения вычисленных U_0/l_{opt} и l_{opt}/d_{opt} становятся значительно меньше.

Таким образом, при ЭВП в оптимальных режимах разрушение проводника происходит однородно за счет тепловых процессов, если отношение начального напряжения к длине проводника лежит в диапазоне значений $2 \cdot 10^5 \leq U_0/l_{opt} \leq 7 \cdot 10^5$ В/м. Значение $l_{opt}/d_{opt} \approx 300 \text{ м}^{-1}$, по-видимому, характеризует ЭВП в оптимальных режимах в целом, учитывая расчеты этого отношения при анализе влияния МГД-неустойчивостей и скин-эффекта.

Из полученных соотношений можно сделать оценку времени достижения максимума тока при ЭВП в оптимальных режимах. Поскольку t_{max} для оптимальных режимов $t_{max} \cong T/4 = \pi/2 \cdot (LC)^{1/2}$ [3], используя (8) несложно получить

$$t_{max} = \frac{25\pi A}{2 \left(\frac{U_0}{L} \right)^2}. \quad (20)$$

Используя оценки для отношения U_0/l_{opt} , из (20) получаем $8 \cdot 10^{-7} \text{ с} \leq t_{max} \leq 10^{-5} \text{ с}$ или же $8 \cdot 10^{-7} \text{ с} \leq \pi/2 \cdot (LC)^{1/2} \leq 10^{-5} \text{ с}$. Этот результат хорошо согласуется с приведенными в [3] интервалами времени, ограничивающими область применимости выражений (1) - (3), полученными экспериментально.

Выводы. Для ЭВП в оптимальных режимах в работе получен ряд соотношений, являющихся инвариантами по отношению к изменению электротехнических параметров энергоисточника и размеров проводника. Показано, что отношение запасенной энергии к массе проводника, к его объему (при одинаковой запасенной энергии), к энергии, необходимой для его полного испарения, а также отношение волнового сопротивления к омическому начальному сопротивлению проводника зависят только от параметров, характеризующих свойства металла. При этом значения критериев P_2 и P_3 одинаковы для всех оптимальных режимов ЭВП вне зависимости от материала проводников. Используя эти соотношения, в работе получены некоторые граничные значения отношений U_0/l_{opt} и l_{opt}/d_{opt} , в рамках которых при ЭВП в оптимальных режимах проводник разрушается однородно за счет тепловых процессов, происходящих в его объеме.

Список литературы: 1. Русских А. Г. Исследование электрического взрыва проводников в зоне высокого давления сходящейся ударной волны / А. Г. Русских, В. И. Орешкин, А. Ю. Лабейский, С. А. Чайковский, А. В. Шишлов // ЖТФ. – 2007. – Т. 77, В. 5. – С. 35–40. 2. Орешкин В. И. Численные исследования интеграла удельного действия тока при электрическом взрыве проводников / В. И. Орешкин, С. А. Баренгольц, С. А. Чайковский // ЖТФ. – 2007. Т. 77, В. 5. – С. 108–116. 3. Кривицкий Е. В. Динамика электровзрыва в жидкости / Е. В. Кривицкий. – К.: Наукова думка, 1986. – 206 с. 4. Khainatskiy S. A. Conditions for realization of an optimum regime of the electric explosion of conductors in liquid media / S. A. Khainatskiy // Technical Physics Letters. – 2009. – Vol. 35, № 4. – P. 299–301. 5. Khainatskiy S. A. Investigations on optimal mode of electric explosion of conductors in water and air / S. A. Khainatskiy // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2009. – Vol. 45, № 5. – P. 397–403. 6. Уэбб Ф. Электрические и оптические характеристики быстрого взрыва проволоки / Ф. Уэбб, Г. Хилтон, П. Левин, Э. Толлестрон // Электрический взрыв проводников. – М.: Мир, 1965. – С. 47–95. 7. Бурцев В. А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В. А. Бурцев, Н. В. Калинин, А. В. Лущинский. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с. 8. Колгатин С. Н. Разрушение медных проводников при протекании по ним тока плотностью, большей 10^7 А/см² / С. Н. Колгатин, М. Л. Лев, Б. П. Перегуд, А. М. Степанов, Т. А. Федорова, А. С. Фурман, А. В. Хачатурьян // Журнал технической физики. – 1989. – Т. 59, В. 9. – С. 123–133. 9. Эпельбаум Я. Г. Перегревная и гидромагнитная неустойчивости жидкого металлического цилиндра с током / Я. Г. Эпельбаум // Журнал технической физики – 1984. – Т. 54, № 3. – С. 492–503.

тоичности жидкого металлического цилиндра с током / Я. Г. Эпельбаум // Журнал технической физики – 1984. – Т. 54, № 3. – С. 492–503.

Bibliography (transliterated): 1. Russkikh A. et al. Issledovanie jelektricheskogo vzryva provodnikov v zone vysokogo davlenija shodjashhejsja udarnoj volny. Zhurnal Technicheskoy Fiziki. 77.5 (2010). pp. 35–40. 2. Oreshkin, V. Chislennye issledovanija integrala udel'nogo dejstvija toka pri jelektricheskom vzryve provodnikov. Zhurnal Technicheskoy Fiziki. 77.5 (2007). pp. 108–116. 3. Krivickij, E. Dinamika jelektrovzryva v zhidkosti. Kyiv: Naukova dumka, 1986. 206 p. 4. Khainatskiy S. Conditions for realization of an optimum regime of the electric explosion of conductors in liquid media. Technical Physics Letters. 35.4 (2009). pp. 299–301. 5. Khainatskiy, S. Investigations on optimal mode of electric explosion of conductors in water and air. Surface Engineering and Applied Electrochemistry 45.5 (2009). pp. 397–403. 6. Ujebb F., et al. Jelektricheskie i opticheskie harakteristiki bystrogo vzryva provolochek. Jelektricheskij vzryv provodnikov. Moscow: Mir, 1965. pp. 47–95. 7. Burcev, V., N. Kalinin, A. Luchinskij Jelektricheskij vzryv provodnikov i ego primenenie v jelektrofizicheskikh ustanovkah. Moscow: Jenergoatomizdat, 1990. 288 p. 8. Kolgatin S. et al. Razrushenie mednyh provodnikov pri protekanii po nim toka plotnost'ju, bol'shej 10^7 A/sm². Zhurnal Tehnicheskoy Fiziki 59.9 (1989). pp. 123–133. Print. 9. Jepel'baum, Ja. Peregrevnaja i gidromagnitnaja neustojchivosti zhidkogo metallicheskogo cilindra s tokom. Zhurnal Tehnicheskoy Fiziki 54.3 (1984): pp. 492–503.

Поступила (received) 25.01.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хайнацкий Сергей Александрович, научный сотрудник; Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, тел.: (095) 664-90-70; e-mail: Khainatskiy@mail.ru.

Khainatskiy Sergey Aleksandrovich, Researcher; Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (095) 664-90-70; e-mail: Khainatskiy@mail.ru.

УДК 621.314:621.373

А. И. ХРИСТО, Н. И. КУСКОВА

СТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ КОЛЕБАНИЙ МАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ ПРИ РАБОТЕ НА РАССОГЛАСОВАННУЮ НАГРУЗКУ

В работе рассмотрен стационарный режим колебаний одноключевого магнитно-полупроводникового генератора импульсов при работе на рассогласованную нагрузку. Проведено численное моделирование периодических электромагнитных процессов в цепях генератора. Получены аналитические выражения, позволяющие качественно и количественно описать переходный процесс на каждом интервале в отдельности. Определены условия существования режима стационарных колебаний на рассогласованной нагрузке, когда период коммутации ключа становится соизмерим с периодом затухающих колебаний электромагнитного процесса обратного перемагничивания.

Ключевые слова: магнитно-полупроводниковый генератор, коммутирующий дроссель, численное моделирование.

Введение. Магнитные генераторы импульсов (МГИ) представляют класс электрических схем, предназначенных для получения импульсов на основе использования нелинейных свойств ферромагнитных сердечников [1-3]. Наиболее значимыми в развитии теории и разработки магнитных и магнитно-полупроводниковых генераторов импульсов являются работы таких ученых, как Гарбер И.С., Розенблат М.А., Меерович Л.А. [4-6]. Ними рассмотрены такие процессы как, резонансный заряд конденсатора

первого звена сжатия, намагничивание и перемагничивание сердечника коммутирующего дросселя, передача энергии в звене при насыщении сердечника и др. Однако полученные аналитические выражения применимы только для случая однонаправленной передачи энергии от генератора в нагрузку, что ограничивает их применение.

В недавней работе [7] выполнен анализ формирования импульса в согласующем оконечном узле магнитного генератора импульсов, где используется

Список литературы: 1. Русских А. Г. Исследование электрического взрыва проводников в зоне высокого давления сходящейся ударной волны / А. Г. Русских, В. И. Орешкин, А. Ю. Лабейский, С. А. Чайковский, А. В. Шишлов // ЖТФ. – 2007. – Т. 77, В. 5. – С. 35–40. 2. Орешкин В. И. Численные исследования интеграла удельного действия тока при электрическом взрыве проводников / В. И. Орешкин, С. А. Баренгольц, С. А. Чайковский // ЖТФ. – 2007. Т. 77, В. 5. – С. 108–116. 3. Кривицкий Е. В. Динамика электровзрыва в жидкости / Е. В. Кривицкий. – К.: Наукова думка, 1986. – 206 с. 4. Khainatskiy S. A. Conditions for realization of an optimum regime of the electric explosion of conductors in liquid media / S. A. Khainatskiy // Technical Physics Letters. – 2009. – Vol. 35, № 4. – P. 299–301. 5. Khainatskiy S. A. Investigations on optimal mode of electric explosion of conductors in water and air / S. A. Khainatskiy // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2009. – Vol. 45, № 5. – P. 397–403. 6. Уэбб Ф. Электрические и оптические характеристики быстрого взрыва проволоки / Ф. Уэбб, Г. Хилтон, П. Левин, Э. Толлестрон // Электрический взрыв проводников. – М.: Мир, 1965. – С. 47–95. 7. Бурцев В. А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В. А. Бурцев, Н. В. Калинин, А. В. Лущинский. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с. 8. Колгатин С. Н. Разрушение медных проводников при протекании по ним тока плотностью, большей 10^7 А/см² / С. Н. Колгатин, М. Л. Лев, Б. П. Перегуд, А. М. Степанов, Т. А. Федорова, А. С. Фурман, А. В. Хачатурьян // Журнал технической физики. – 1989. – Т. 59, В. 9. – С. 123–133. 9. Эпельбаум Я. Г. Перегревная и гидромагнитная неустойчивости жидкого металлического цилиндра с током / Я. Г. Эпельбаум // Журнал технической физики – 1984. – Т. 54, № 3. – С. 492–503.

тоичности жидкого металлического цилиндра с током / Я. Г. Эпельбаум // Журнал технической физики – 1984. – Т. 54, № 3. – С. 492–503.

Bibliography (transliterated): 1. Russkikh A. et al. Issledovanie jelektricheskogo vzryva provodnikov v zone vysokogo davlenija shodjashhejsja udarnoj volny. Zhurnal Technicheskoy Fiziki. 77.5 (2010). pp. 35–40. 2. Oreshkin, V. Chislennye issledovanija integrala udel'nogo dejstvija toka pri jelektricheskom vzryve provodnikov. Zhurnal Technicheskoy Fiziki. 77.5 (2007). pp. 108–116. 3. Krivickij, E. Dinamika jelektrovzryva v zhidkosti. Kyiv: Naukova dumka, 1986. 206 p. 4. Khainatskiy S. Conditions for realization of an optimum regime of the electric explosion of conductors in liquid media. Technical Physics Letters. 35.4 (2009). pp. 299–301. 5. Khainatskiy, S. Investigations on optimal mode of electric explosion of conductors in water and air. Surface Engineering and Applied Electrochemistry 45.5 (2009). pp. 397–403. 6. Ujebb F., et al. Jelektricheskie i opticheskie harakteristiki bystrogo vzryva provolochek. Jelektricheskij vzryv provodnikov. Moscow: Mir, 1965. pp. 47–95. 7. Burcev, V., N. Kalinin, A. Luchinskij Jelektricheskij vzryv provodnikov i ego primenenie v jelektrofizicheskikh ustanovkah. Moscow: Jenergoatomizdat, 1990. 288 p. 8. Kolgatin S. et al. Razrushenie mednyh provodnikov pri protekanii po nim toka plotnost'ju, bol'shej 10^7 A/sm². Zhurnal Tehnicheskoy Fiziki 59.9 (1989). pp. 123–133. Print. 9. Jepel'baum, Ja. Peregrevnaja i gidromagnitnaja neustojchivosti zhidkogo metallicheskogo cilindra s tokom. Zhurnal Tehnicheskoy Fiziki 54.3 (1984): pp. 492–503.

Поступила (received) 25.01.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хайнацкий Сергей Александрович, научный сотрудник; Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, тел.: (095) 664-90-70; e-mail: Khainatskiy@mail.ru.

Khainatskiy Sergey Aleksandrovich, Researcher; Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (095) 664-90-70; e-mail: Khainatskiy@mail.ru.

УДК 621.314:621.373

А. И. ХРИСТО, Н. И. КУСКОВА

СТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ КОЛЕБАНИЙ МАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ ПРИ РАБОТЕ НА РАССОГЛАСОВАННУЮ НАГРУЗКУ

В работе рассмотрен стационарный режим колебаний одноключевого магнитно-полупроводникового генератора импульсов при работе на рассогласованную нагрузку. Проведено численное моделирование периодических электромагнитных процессов в цепях генератора. Получены аналитические выражения, позволяющие качественно и количественно описать переходный процесс на каждом интервале в отдельности. Определены условия существования режима стационарных колебаний на рассогласованной нагрузке, когда период коммутации ключа становится соизмерим с периодом затухающих колебаний электромагнитного процесса обратного перемагничивания.

Ключевые слова: магнитно-полупроводниковый генератор, коммутирующий дроссель, численное моделирование.

Введение. Магнитные генераторы импульсов (МГИ) представляют класс электрических схем, предназначенных для получения импульсов на основе использования нелинейных свойств ферромагнитных сердечников [1-3]. Наиболее значимыми в развитии теории и разработки магнитных и магнитно-полупроводниковых генераторов импульсов являются работы таких ученых, как Гарбер И.С., Розенблат М.А., Меерович Л.А. [4-6]. Ними рассмотрены такие процессы как, резонансный заряд конденсатора

первого звена сжатия, намагничивание и перемагничивание сердечника коммутирующего дросселя, передача энергии в звене при насыщении сердечника и др. Однако полученные аналитические выражения применимы только для случая однонаправленной передачи энергии от генератора в нагрузку, что ограничивает их применение.

В недавней работе [7] выполнен анализ формирования импульса в согласующем оконечном узле магнитного генератора импульсов, где используется

метод припасовывания для решений интегро-дифференциальных уравнений, на границе перехода сердечника дросселя из одного состояния в другое. Однако аналитические выражения получены без учета характера изменения индукции в сердечнике коммутирующего дросселя между его крайними состояниями, что затрудняет определение последующей динамики процесса.

В работе [8] исследованы электромагнитные процессы единичного цикла колебаний одноключевого магнитно-полупроводникового генератора импульсов (МППИ), при котором нагрузка как согласована со звеном сжатия генератора, так и рассогласована. Стационарный режим колебаний предполагает повторяемость и неизменность характеристик процесса колебаний в магнитном генераторе импульсов. Повторяемость выходных импульсов задается периодом коммутации полупроводникового ключа и возобновлением заряда конденсатора первого звена сжатия (зарядного контура). При максимальной энергии, запасаемой в конденсаторе на которую рассчитан коммутирующий дроссель (КД), генератор имеет устойчивую работу только при полном размахе индукции в сердечнике КД. Данная статья является продолжением статьи [8] в части рассмотрения режима работы одноключевого МППИ на рассогласованную нагрузку.

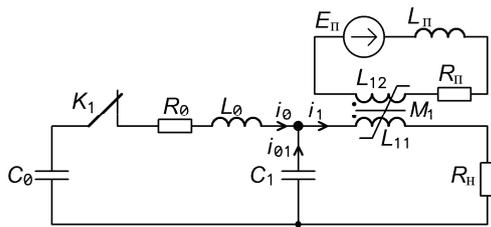


Рис.1 – Схема одноключевого магнитного генератора импульсов

Целью работы является определение условий существования стационарного режима колебаний в одноключевом МППИ при работе на рассогласованную нагрузку, когда период коммутации ключа становится соизмеримым с периодом затухающих колебаний процесса обратного перемагничивания.

Схема одноключевого МППИ приведена на рис.1. Схема состоит из последовательного преобразовательного звена $C_0-R_0-L_0$, последовательного звена сжатия C_1-L_1 и нагрузки $R_н$. Для реализации режима обратного перемагничивания сердечник КД подмагничен постоянным током $J_π$.

На основании законов Кирхгофа для контуров схемы записываются интегро-дифференциальные уравнения, которые решаются численно методом Эйлера [9]. Используя дискретный аналог производной и интеграла, получаем систему алгебраических уравнений для определения токов и напряжений в цепях генератора (1):

$$\begin{cases} i_0^{k+1} = i_0^k + \Delta t (S_1 - S_0 - R_0 \cdot i_0^k) / L_0; \\ i_1^{k+1} = i_1^k - \frac{(S_1^k + R_н \cdot i_1^k) \cdot \Delta t}{L_{11}}; \\ i_{01}^{k+1} = i_1^{k+1} - i_0^{k+1}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} S_0 = \frac{1}{2C_0} \sum_{n=1}^k (i_0^n + i_0^{n-1}) \Delta t; \\ S_1 = \frac{1}{2C_1} \sum_{n=1}^k (i_{01}^n + i_{01}^{n-1}) \Delta t. \end{cases} \quad (1)$$

Параметры схемы: емкость конденсатора – $C_0 = 470 \cdot 10^{-6}$ Ф, емкость конденсатора звена сжатия – $C_1 = 0,5 \cdot 10^{-6}$ Ф, индуктивность зарядного дросселя – $L_0 = 32 \cdot 10^{-6}$ Гн, начальное напряжение на конденсаторе $C_0-U_{C1} = 300$ В, начальное напряжение на конденсаторе $C_1-U_{C1} = 0$ В, активное сопротивление нагрузки – $R_н = 2$ Ом, ток подмагничивания источника тока – $J_π = 1$ А, сечение сердечника дросселя $L_1-S_m = 2,7 \cdot 10^{-4}$ м², длина средней линии сердечника дросселя $L_1-l_m = 0,129$ м, количество витков основной обмотки дросселя – $w_1 = 20$, количество витков обмотки подмагничивания – $w_2 = 10$, период повторения коммутации ключа $K_1-T = 500$ мкс. Характеристики материала сердечника: индукция насыщения – $B_s = 0,44$ Тл, остаточная индукция – $B_r = 0,37$ Тл, коэрцитивная сила – $H_c = 10$ А/м. Используя модель КД предложенную в работе [8] произведем численное моделирование переходных процессов в цепях МППИ на рассогласованную нагрузку при обеспечении периодичности коммутации ключа K_1 .

Материалы исследования. На рис. 2, а, б приведены результаты моделирования работы МППИ на рассогласованную нагрузку при единичном отпирании ключа K_1 . Расчеты показывают, что в таком случае индукция примет вид серии затухающих колебаний параболической формы. Каждый участок стационарного режима колебаний МППИ на несогласованную нагрузку, может быть описан аналитическим выражением. Разобьем колебания на отдельные интервалы, и приступим к выводу уравнений, начиная с зарядного контура. В нулевой момент времени сердечник дросселя находится в состоянии близком к отрицательному насыщению. При отпирании ключа K_1 происходит заряд конденсатора C_1 . В момент времени t_1 ток заряда конденсатора достигает нуля и ключ K_1 запирается. Определим максимальную амплитуду напряжения на конденсаторе, длительность заряда, амплитуду тока заряда.

Примем, что в интервале времени t_0-t_1 через обмотку КД в нагрузку протекает пренебрежимо малый ток и действием разрядного контура можно пренебречь. Зарядный контур состоит из конденсатора источника питания C_0 , конденсатора звена сжатия C_1 , зарядной индуктивности L_0 и активного сопротивления контура R_0 . По второму закону Кирхгофа для баланса напряжений составляется интегро-дифференциальное уравнение. Решение уравнения произведем согласно классического метода решения подобных задач [10]. Используя подстановку вида – $i(t) = A \cdot \exp(p \cdot t)$ получаем характеристическое уравнение второго порядка $a_0 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_2 = 0$.

Коэффициенты уравнения:

$$a_0 = L_0 \cdot C_0 \cdot C_1, \quad a_1 = R_0 \cdot C_0 \cdot C_1, \quad a_2 = C_0 + C_1.$$

Так как разряд одного конденсатора на другой

является колебательным, то корни квадратного уравнения будут комплексно-сопряженными $p_{1,2} = -\alpha_1 \pm j\omega_1$.

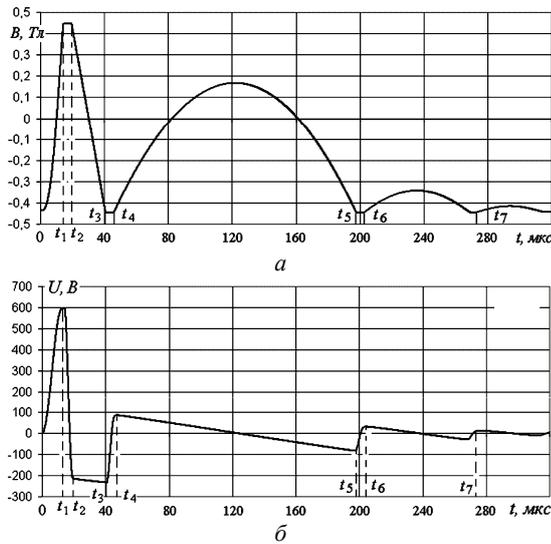


Рисунок 2 – Электромагнитные характеристики разрядного процесса: а – динамика индукции в сердечнике КД; б – динамика напряжения на конденсаторе C_1

Циклическая частота колебаний контура равна – $\omega_1 = \frac{\sqrt{R_0^2 \cdot C_0^2 \cdot C_1^2 - 4 \cdot L_0 \cdot C_0 \cdot C_1 \cdot (C_0 + C_1)}}{2 \cdot L_0 \cdot C_0 \cdot C_1}$, декремент затухания колебаний – $\alpha = -\frac{R_0}{2 \cdot L_0}$. Начальными условиями

есть напряжения на конденсаторах в нулевой момент времени и ток в цепи. В общем случае напряжение на конденсаторе может быть как положительным, так и отрицательным. При положительном начальном напряжении на C_1 амплитуда зарядного тока и результирующий уровень напряжения должны уменьшаться, при отрицательном начальном напряжении на C_1 результат обратный. Длительность полупериода тока, при котором напряжение на конденсаторе принимает максимальное значение $t_1 = \pi/\omega$. Решением интегро-дифференциального уравнения является характеристика тока в цепи, уравнение которого, имеет вид:

$$i_0(t) = \frac{U_{c0} - U_{c1}}{L_0 \cdot \omega_1} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \cdot \exp(\alpha_1 \cdot t). \quad (2)$$

Максимальная амплитуда тока заряда достигается в момент времени t_{1m} равный половине интервала $0-t_1$, подставляя в уравнение (2) определяем максимальную амплитуду тока заряда. С учетом того, что при $t = t_{1m} \sin(\omega_1 \cdot t) \rightarrow 1$, имеем:

$$i_0(t_{1m}) = \frac{U_{c0} - U_{c1}}{L_0 \cdot \omega_1} \cdot \exp(\alpha \cdot t_{1m}). \quad (3)$$

Интегрируя уравнения для тока по времени и определяя начальные условия для напряжения на конденсаторе C_1 , получаем уравнение изменения напряжения на конденсаторе C_1 :

$$U_{c1}(t) = U_{c0} + \frac{U_{c0} - U_{c1}}{L_0 \cdot \omega_1 \cdot C_1} \left(\frac{-\omega_1}{\alpha_1^2 + \omega_1^2} \cdot \exp(\alpha_1 \cdot t) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + \right.$$

$$\left. + \frac{\alpha_1}{\alpha_1^2 + \omega_1^2} \exp(\alpha_1 \cdot t) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \right). \quad (4)$$

Если считать, что величина $\frac{\alpha_1}{\alpha_1^2 + \omega_1^2}$ пренебрежимо мала по сравнению с величиной $\frac{\omega_1}{\alpha_1^2 + \omega_1^2}$, и первая стремится к нулю, то уравнения конденсатора C_1 можно переписать так:

$$U_{c1}(t) = U_{c0} + \frac{U_{c0} - U_{c1}}{L_0 \cdot \omega_1 \cdot C_1} \left(\frac{-\omega_1}{\alpha_1^2 + \omega_1^2} \cdot \exp(\alpha_1 \cdot t) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) \right). \quad (5)$$

К концу полупериода при достижении тока нулевого значения напряжение на конденсаторе достигнет максимального значения – этот момент времени есть t_1 . Тогда в уравнении $\cos(\omega_1 \cdot t) = -1$.

$$U_{\max}(t_1) = U_{c0} + \frac{U_{c0} - U_{c1}}{L_0 \cdot \omega_1 \cdot C_1} \left(\frac{\omega_1}{\alpha_1^2 + \omega_1^2} \cdot \exp(\alpha_1 \cdot t_1) \right). \quad (6)$$

Теперь определим закон изменения индукции в сердечнике дросселя в процессе заряда конденсатора C_1 . Согласно закону электромагнитной индукции напряжение на катушке индуктивности с током пропорционально скорости изменения магнитного потока пронизывающего поперечное сечение катушки. Магнитный поток определяется алгебраической суммой потоков создаваемых каждым витком катушки в отдельности.

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(B \cdot S_m \cdot w_1)}{dt} = -S_m \cdot w_1 \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (7)$$

Интегрируя уравнения по времени, определяем закон изменения индукции с учетом начальных условий:

$$B(t) = (-B_s) - \frac{1}{S_m \cdot w_1} \int e_L(t) \cdot dt. \quad (8)$$

где $e_L(t)$ – закон изменения напряжение на дросселе, w_1 – количество витков основной обмотки дросселя, S_m – поперечное сечение магнитопровода. Будем полагать, что на основной кривой намагничивания, когда ток через обмотку дросселя пренебрежимо мал, к обмотке дросселя прикладывается напряжение конденсатора C_1 . Условимся пренебречь временем задержки насыщения КД и положим, что момент t_1 совпадает с моментом насыщения сердечника КД. Действие тока подмагничивания на напряжение заряда конденсатора также будем считать пренебрежимо малым. Теперь с учетом выполненных допущений, подставляя уравнение (5) в уравнение (8) и интегрируя его, найдем закон изменения индукции:

$$B(t) = -B_s + \frac{1}{S_m \cdot w_1} \left(U_{c0} \cdot t + \frac{U_{c0} - U_{c1}}{L_0 \cdot \omega_1 \cdot C_1} \cdot \frac{-\omega_1}{\alpha_1^2 + \omega_1^2} \times \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_1^2 + \omega_1^2} \cdot \exp(\alpha_1 \cdot t) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + \frac{\omega}{\alpha_1^2 + \omega_1^2} \exp(\alpha_1 \cdot t) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \right) \right). \quad (9)$$

Так как величина $\frac{\alpha_1}{\alpha_1^2 + \omega_1^2}$ значительно меньше $\frac{\omega_1}{\alpha_1^2 + \omega_1^2}$, то вторым членом в скобках можно пренебречь, тогда с учетом упрощений закон изменения индукции запишется так:

$$B(t) = -B_s + \frac{1}{S_m \cdot w_1} \left(U_{C0} \cdot t + \frac{U_{c1} - U_{c0}}{L_0 \cdot \omega_1 \cdot C_1} \times \frac{\omega_1^2}{(\alpha_1^2 + \omega_1^2)^2} \cdot \exp(\alpha_1 \cdot t) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \right). \quad (10)$$

После достижения индукции противоположного порога насыщения (момент времени t_1) проницаемость сердечника падает в десятки тысяч раз и возбуждается разряд конденсатора на активное сопротивление нагрузки через индуктивность насыщенного дросселя. Разрядный контур при этом состоит из конденсатора C_1 , индуктивности насыщенного дросселя L_1 и сопротивления нагрузки R_H . Для образующегося контура составляется характеристическое уравнение второго порядка $a_0 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_2 = 0$.

Коэффициенты уравнения:

$$a_0 = L_1 \cdot C_1; \quad a_1 = R_H \cdot C_1; \quad a_2 = 1.$$

Решением уравнения является комплексно сопряженные корни. Колебательный процесс в контуре определяется уравнением тока:

$$i_1(t) = \frac{U_{c1}}{L_1 \cdot \omega_2} \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) \cdot e^{\alpha_2 \cdot t},$$

где U_{c1} – напряжение на конденсаторе C_1 в момент насыщения дросселя $Dp1$, циклическая частота контура –

$$\omega_2 = \frac{\sqrt{R_H^2 \cdot C_1^2 - 4 \cdot L_1 \cdot C_1}}{2 \cdot L_1 \cdot C_1}, \quad \text{коэффициент затухания}$$

$$\alpha_2 = -\frac{R_H}{2 \cdot L_1}. \quad \text{Индуктивность дросселя при насыщении}$$

сердечника определяется по формуле в работе [8]. В момент времени t_2 процесс разряда заканчивается, и дроссель выходит из положительного насыщения. Длительность разрядного тока определяется как $t_2 = \frac{\pi}{\omega_2}$.

При рассогласовании сопротивления нагрузки с волновым сопротивлением контура процесс разряда будет колебательным и при достижении тока нулевого значения дроссель закрывается, а на конденсаторе появляется остаточное напряжение обратной полярности, которое будет перемагничивать коммутирующий дроссель к отрицательному порогу насыщения. Аналогично предыдущим действиям по выводу уравнения (5) определяем закон изменения напряжения при разряде C_1 на R_H :

$$U_{C1}(t) = \frac{U_{C1}}{L_1 \cdot \omega_2 \cdot C_1} \left(\frac{\omega_2}{\alpha_2^2 + \omega_2^2} \cdot \exp(\alpha_2 \cdot t) \cdot \cos(\omega_2 \cdot t) \right). \quad (11)$$

Теперь для момента времени окончания разряда определяем остаточное напряжение на C_1 :

$$U_{C1ost}(t_2) = \frac{-U_{C1}}{L_1 \cdot \omega_2 \cdot C_1} \left(\frac{\omega_2}{\alpha_2^2 + \omega_2^2} \cdot \exp(\alpha_2 \cdot t_2) \right). \quad (12)$$

В интервале времени t_2-t_3 под действием отрицательного остаточного напряжения и тока подмагничивания дроссель будет перемагничиваться к отрицательному порогу насыщения. Согласно работе [6] напряжение, на обмотке дросселя, создаваемое током подмагничивания, определяется по формуле:

$$U_{C1} = -\frac{w_p \cdot I_p \cdot t}{w_1 \cdot C_1}, \quad (13)$$

где I_p – постоянный ток подмагничивания дросселя, w_p – количество витков обмотки подмагничивания. Подставляя в уравнение (8) сумму напряжений $U_{C1} + U_{C1ost}$ и интегрируя по времени, получим закон изменения индукции в дросселе при перемагничивании под действием остаточного напряжения и тока подмагничивания:

$$B(t) = +B_s + \frac{1}{S_m \cdot w_1} \left(U_{C1ost} \cdot t - \frac{1}{2} \cdot \frac{I_p \cdot w_p}{w_1} \cdot \frac{t^2}{C_1} \right). \quad (14)$$

Приравняв уравнение к (-Bs) определяем длительность интервала t_2-t_3 , путем нахождения нужного корня квадратного уравнения:

$$-\frac{I_p \cdot w_p}{2 \cdot w_1} \cdot \frac{t^2}{C_1} + U_{C1ost} \cdot t + 2 \cdot B_s \cdot S_m \cdot w_1 = 0,$$

откуда решение для большего корня:

$$t_3 = \frac{w_1 \cdot C_1 \cdot \left(U_{C1ost} + \sqrt{U_{C1ost}^2 + \frac{4 \cdot I_p \cdot w_p \cdot B_s \cdot S_m}{C_1}} \right)}{I_p \cdot w_p}. \quad (15)$$

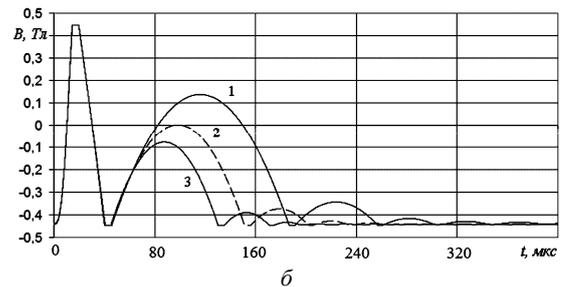
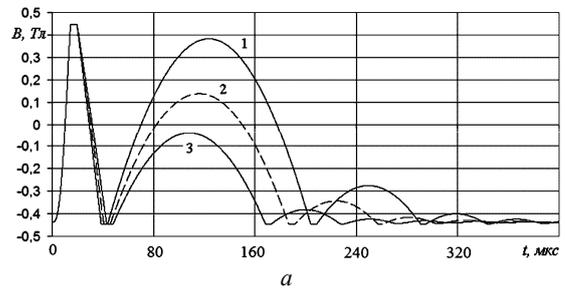


Рисунок 3 – Динамика индукции в сердечнике КД: а – при изменении сопротивления нагрузки; б – при изменении тока подмагничивания

Дальнейший ход процесса аналогичен предыдущему. В интервале времени t_3-t_4 снова происходит разряд на нагрузку, однако, теперь остаточное напряжение становится положительным. Длительность этого разряда такая же, как для интервала времени t_1-t_2 . Величина остаточного напряжения для момента времени t_3 также определяется по формуле (12). Отношение величины остаточного напряжения, полу-

ченного в момент времени t_2 , к величине остаточного напряжения полученного в момент времени t_3 , определяется по формуле:

$$\frac{U_{остт2}}{U_{остт3}} = \frac{U_{i0}}{U_{i3}} \cdot \exp(\alpha_2(t_2 - t_4)). \quad (16)$$

Следовательно, величина каждого последующего остаточного напряжения будет меньше предыдущего согласно экспоненциальному закону, энергия согласно того же закона только в квадратичной степени.

Ток подмагничивания действует таким образом, что препятствует повторному насыщению дросселя в положительном направлении, поэтому характеристика индукции на участке t_4-t_5 описывает параболический импульс. Вершина импульса совпадает с нулем линейно нарастающего напряжения на конденсаторе C_1 . Траектория параболического импульса также описывается уравнением (14), только изменение начинается от $(-B_s)$. Приравнявая уравнение к $-B_s$ определяются корни квадратного уравнения, а именно моменты времени пересечения с $-B_s$.

Длительность параболического импульса:

$$t_{imp} = \frac{2U_{C1} \cdot w_1 \cdot C_1}{I_p \cdot w_p}. \quad (17)$$

Амплитуда параболического импульса определяется нахождением экстремума функции, то есть производная от функции приравняется к нулю. В момент времени $t_{max} = \frac{U_{C1} \cdot w_1 \cdot C_1}{I_p \cdot w_p}$ достигается вершина параболического импульса, подставляя в уравнение (14) получаем амплитуду параболического импульса:

$$B_{max} = -B_s + \frac{1}{2 \cdot S_m \cdot w_1} \cdot \frac{U_{C1ost}^2 \cdot w_1 \cdot C_1}{I_p \cdot w_p}. \quad (18)$$

Согласно формулам (17), (18) длительность и амплитуда параболического импульса прямо пропорциональна остаточному напряжению и обратно пропорциональна току подмагничивания.

На рис. 3, а показаны характеристики параболического импульса в зависимости от сопротивления нагрузки $1 - R_H = 1,8 \text{ Ом}$, $2 - R_H = 2 \text{ Ом}$, $3 - R_H = 2,2 \text{ Ом}$ при токе подмагничивания $I_p = 2 \text{ А}$. На рис. 4, б характеристики параболического импульса в зависимости от тока подмагничивания $1 - I_p = 1 \text{ А}$, $2 - I_p = 1,5 \text{ А}$, $3 - I_p = 2 \text{ А}$ при сопротивлении нагрузки $R_H = 2 \text{ Ом}$. На основании полученных характеристик можно показать, что момент времени t_3 достижения отрицательного насыщения КД также зависит от сопротивления нагрузки R_H . Этот результат объясняется согласно формуле (12), в которой остаточное напряжение на C_1 зависит от сопротивления нагрузки, а также согласно формуле (15) момент достижения индукции отрицательного насыщения t_3 .

Таким образом, наибольшей преградой увеличения частоты импульсов в МПГИ является первый наиболее продолжительный импульс индукции параболической формы, имеющий наибольшую амплитуду по сравнению с остальными. Однако, на всем интервале процесса обратного перемагничивания можно выделить моменты времени, когда индукция прини-

мает значение отрицательного насыщения. Моделирование показывает, что, если момент отпирания ключа совместить с моментом времени выхода дросселя из обратного насыщения и появления на конденсаторе C_1 положительного остаточного напряжения, то в МПГИ может быть получен стационарный режим колебаний. Если есть запас по коммутируемой энергии, то производить коммутацию ключа K_1 можно вблизи подножия параболического импульса с обеих его сторон, тогда может быть получен стационарный режим колебаний МПГИ без обратного насыщения. Моменты времени, когда индукция принимает отрицательное насыщение, обозначены на характеристиках колебаний как t_4, t_6, t_7 (рис. 2, а, б).

На рис.4, а, б, приведены характеристики индукции в КД и напряжения на конденсаторе C_1 при отпирании ключа K_1 в момент времени t_4 .

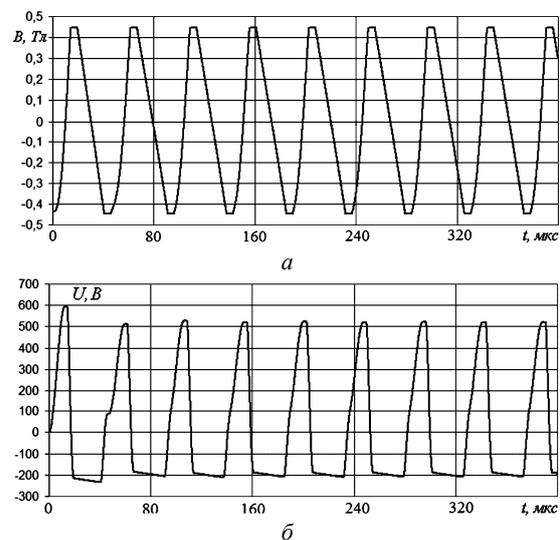


Рисунок – Электромагнитные характеристики МГИ стационарного режима колебаний: а – динамика индукции в КД; б – динамика напряжения на конденсаторе C_1

Как видно из графика характеристики индукции для стационарного режима колебаний КД насыщается два раза за период колебания, что обеспечивает наиболее благоприятный режим работы КД. Отличительной особенностью выявленного режима колебаний в одноключевом МПГИ является то, что зарядное напряжение на конденсаторе снижается на величину положительного остаточного напряжения, а амплитуда прямого и обратного импульса тока уменьшается и увеличивается соответственно. Однако реализованный способ коммутации ключа K_1 позволяет повысить частоту МПГИ более чем в 5-7 раз и за счет этого обеспечить стационарность режима колебаний генератора на рассогласованной нагрузке.

Путем повторной коммутации ключа в момент времени t_2 можно вернуть остаток энергии неизрасходованный в нагрузке обратно в источник питания. В одноключевом МПГИ возвращение энергии в источник питания не обеспечит повышение частоты следования. Напротив неизрасходованную энергию можно использовать для повышения частоты следования импульсов на несогласованной нагрузке. Для оп-

ределения момента времени $t_{\text{воз}}$ когда характеристика напряжения на конденсаторе C_1 принимает нулевое значение приравняем уравнение (5) к нулю и решая полученное трансцендентное уравнение относительно t определим момент $t_{\text{воз}}$:

$$t_{\text{воз}} = \frac{\arccos\left(\frac{U_{C0} \cdot L_0 \cdot C_1 \cdot (\alpha_1^2 + \omega_1^2)}{U_{C0} - U_{C0}}\right)}{\omega_1}. \quad (19)$$

Подставляя $t_{\text{воз}}$ в уравнение для тока зарядного контура (3) можно определить ток, при котором напряжение на C_1 станет равным нулю. Кроме этого, возвращая неиспользуемую энергию обратно в источник питания, необходимо оборвать часть тока при снижении напряжения до нуля, что ограничит возврат энергии в источник питания.

Основные выводы по работе. Показано, что в схеме магнитно-полупроводникового генератора импульсов с последовательным преобразовательным звеном при работе на рассогласованную нагрузку существует стационарный режим колебаний с повышенной частотой следования, условием которого является совмещение момента коммутации полупроводникового ключа с моментом времени выхода сердечника коммутирующего дросселя из состояния обратного насыщения.

Выведены аналитические выражения, позволяющие определить условия существования стационарного режима колебаний магнитно-полупроводникового генератора импульсов с последовательным преобразовательным звеном при работе на рассогласованную нагрузку. Показано, что длительность и амплитуда параболического импульса прямо пропорциональна емкости конденсатора звена сжатия, остаточному напряжению на нем, количеству витков основной обмотки КД и обратно пропорциональна току подмагничивания, и количеству витков обмотки подмагничивания КД.

Список литературы: 1. *Choi J.* Introduction of the magnetic pulse compressor (mpc) – fundamental review and practical application / *J. Choi* // Journal of electrical engineering & technology. – 2010. – Vol 5, № 3. – P. 484–492. 2. *Nakhe S.V.* Energy deposition studies in a copper vapor laser under different pulse excitation schemes / *S.V. Nakhe, B.S. Rajanikanth, R. Bratnagar* // Measurement Science and Technology. – 2003. – № 14. – P. 607-613. 3. *Zhang D.* A compact, high repetition-rate, nanosecond pulse generator based on magnetic pulse com-

pression system / *D. Zhang, Y. Zhou, J. Wang, P. Yan* // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2011. – Vol. 18. – P. 1151-1157. 4. *Гарбер И.С.* Магнитные импульсные модуляторы / *И.С. Гарбер*. – М.: Советское радио, 1964. – 159 с. 5. *Сторм Г.Ф.* Магнитные усилители / *Г.Ф. Сторм*. – М.: ИЛ, 1957. – 568 с. 6. *Меерович Л.А.* Магнитные генераторы импульсов / *Л.А. Меерович, И.М. Ватин, Э.Ф. Зайцев, В.М. Кандыкин*. – М.: Советское радио, 1968. – 475 с. 7. *Волков И.В.* Исследование процесса формирования выходных импульсов магнитно-полупроводникового генератора / *И.В. Волков, В.И. Зозулев, С.В. Подольный, Д.А. Шолох* // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 1. – С. 17-22. 8. *Христо А.И.* Численное моделирование электромагнитных процессов в схеме магнитного генератора импульсов / *А.И. Христо, В.И. Зозулев, Д.А. Шолох* // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 2. – С. 22 - 28. 9. *Демидович Б.П.* Численные методы анализа / *Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова*. – М.: Наука, 1967. – 368 с. 10. *Демирчян К.С.* Теоретические основы электротехники. Том 2 / *К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин*. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Choi J.* Introduction of the magnetic pulse compressor (mpc) – fundamental review and practical application. *J. Choi*. Journal of electrical engineering & technology. 2010. Vol 5, No 3. pp. 484–492. 2. *Nakhe S.V.* Energy deposition studies in a copper vapor laser under different pulse excitation schemes. *S.V. Nakhe, B.S. Rajanikanth, R. Bratnagar*. Measurement Science and Technology. 2003. No 14. pp. 607-613. 3. *Zhang D.* A compact, high repetition-rate, nanosecond pulse generator based on magnetic pulse compression system. *D. Zhang, Y. Zhou, J. Wang, P. Yan* IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011. Vol. 18. pp. 1151-1157. 4. *Garber I.S.* Magnitnye impul'snye moduljatory. *I.S. Garber*. Moscow: Sovetskoe radio, 1964. 159 p. 5. *Storm G.F.* Magnitnye usiliteli. *G.F. Storm*. Moscow: IL, 1957. 568 p. 6. *Meerovich L.A.* Magnitnye generatory impul'sov. *L.A. Meerovich, I.M. Vatin, Je.F.Zajcev, V.M. Kandykin*. Moscow: Sovetskoe radio, 1968. 475 p. 7. *Volkov I.V.* Issledovanie processa formirovaniya vyhodnyh impul'sov magnitno-poluprovodnikovogo generatora. *I.V. Volkov, V.I. Zozulev, S.V. Podol'nyj, D.A. Sholoh* Tehnichna elektrodinamika. 2012. No 1. pp. 17-22. 8. *Khristo A.I.* Chislennoe modelirovanie jelektromagnitnyh processov v sheme magnitnogo generatora impul'sov. *A.I. Khristo, V.I. Zozulev, D.A. Sholoh*. Tehnichna elektrodinamika. 2014. No 2. pp.22-28. 9. *Demidovich B.P.* Chislennye metody analiza. *B.P. Demidovich, I.A. Maron, Je.Z. Shuvalova*. Moscow: Nauka, 1967. 368 p. 10. *Demirchjan K.S., Nejman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L.* Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki. Tom 2. Saint-Petersburg.: Piter, 2003. 576 p.

Поступила (received) 04.02.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Христо Александр Иванович, младший научный сотрудник; Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, тел.:+38(068) 116-11-94; email: alexander.khristo@ukr.net.

Khristo Aleksander Ivanovich, research assistant; Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.:+38(068) 116-11-94; email: alexander.khristo@ukr.net.

Кускова Наталья Ивановна, доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований Института импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Kuskova Natalya Ivanovna, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electro-physical Researches of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

УДК 537.52:542.9:661.66

Д. И. ЧЕЛПАНОВ, В. Ю. БАКЛАРЬ, Н. И. КУСКОВА, А. Н. КОРЗИНОВА**УСЛОВИЯ РАЗРЯДНОИМПУЛЬСНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ**

Получены аналитические зависимости параметров разрядного контура от термодинамических характеристик порошковых систем исходных реагентов. Рассчитаны электротехнические параметры для инициирования процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза углеродных наноматериалов в системах порошков составами алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + политетрафторэтилен + железо. Проведены экспериментальные исследования процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в выбранных порошковых системах. Построены температурные профили для волн горения в выбранных порошковых системах, которые представлены в виде зависимостей теплового потока от температуры и температуры от времени.

Ключевые слова: электроразрядный контур, разрядноимпульсное инициирование, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, углеродные наноматериалы, углеродные нанотрубки.

Введение. Углеродные нанотрубки, фуллерены, многослойный графит, луковичные структуры – многочисленные примеры из разнообразного множества углеродных наноматериалов (УНМ), имеющих уникальные электрические, термические, химические и механические свойства, существенно отличающиеся от свойств основных аллотропных форм углерода (графит и алмаз), и обуславливающие их широкое применение во многих отраслях промышленности (преобразовательная и полупроводниковая техника [1], медицина, производство абразивных материалов, накопление энергии и др.).

Развитие многочисленных методов получения УНМ (дуговой разряд, CVD, лазерная абляция) позволяет успешно синтезировать необходимые модификации углерода, однако проблемы увеличения производительности синтеза и выхода при уменьшении энергозатрат и упрощении технологической составляющей остаются актуальными.

Анализ предварительных исследований и литературы. Полувековые наработки научных основ самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) карбидов, силицидов, боридов, абразивных и многих других материалов только в последние десятилетия начали применяться для успешного получения углеродных наноматериалов.

Характерные особенности метода СВС углеродных наноматериалов в целом (температуры от 1000 до 4000 К; малые времена синтеза (0,05 – 1 с); скорости нагревания вещества в волне до миллиона градусов в секунду; применение исходных реагентов с высоким содержанием углерода, способных формировать углеродные наноструктуры; достаточная энергоэффективность при относительно простом технологическом оборудовании) позволяют рассматривать его как перспективный метод синтеза УНМ. В случае необходимости получения конкретно углеродных нанотрубок методом СВС, в исходную смесь реагентов требуется добавить один из известных катализаторов роста нанотрубок (например, металлы подгруппы железа).

Малые времена синтеза и высокие скорости нагревания вещества в волне говорят о том, что СВС следует отнести к категории экстремальных химиче-

ских процессов. Такие темпы нагревания конденсированного вещества с помощью внешних источников энергии осуществить трудно. Экспериментально установлено, что СВС относится к трудно инициируемым процессам горения. Температура и энергия зажигания этих систем превосходят таковые для известных конденсированных взрывчатых веществ и порохов.

В нашей предыдущей статье [2] показаны основные преимущества предлагаемого нами способа разрядноимпульсной инициации процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза УНМ в исходных системах порошков алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + композит Ф4К20. Однако для реализации стабильного инициирования СВС необходимо получить аналитические зависимости параметров разрядного контура от температуры инициирования экзотермической реакции.

В последние годы развиваются исследования структуры волны горения, основанные на результатах измерения профилей температуры, без которых невозможно понять детальный механизм СВС.

Целью работы является определение условий разрядноимпульсного инициирования и динамических параметров процесса СВС в порошковых системах алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + политетрафторэтилен + железо.

Параметры электроразрядного контура для инициирования СВС. Иницирование волны горения СВС реализовывалось кратковременным импульсом тока (локальный нагрев экзотермической смеси разрядным импульсом тока, текущего по проводнику).

Расчет электротехнических параметров разрядного контура для инициирования СВС проводили на основании полученного решения системы магнито-гидродинамических уравнений, описывающих процесс нагрева цилиндрического проводника импульсом тока [3,4].

Для инициирования волны горения необходимо нагреть смесь в некотором объеме до момента зажигания экзотермической реакции. Интенсивность тепловыделения источника зажигания должна превышать теплоотвод из нагреваемой зоны.

Определим температуру иницирования СВС как наименьшую температуру смеси реагирующих веществ, при нагреве до которой происходит резкое увеличение скорости экзотермической реакции, приводящее к возникновению волны горения. Эта температура требуется для достижения энергии активации реакции горения, после чего горение происходит за счет выделения тепла экзотермической реакции на фронте СВС.

Время иницирования τ_i (промежуток времени между началом импульсного разряда и фактическим зажиганием экзотермической реакции) должно быть значительно меньше полной продолжительности процесса СВС (несколько секунд). Ограничим длительность выделения энергии, достаточной для иницирования волны горения, первым полупериодом тока, текущего по проводнику. Пусть время иницирования $\tau_i \leq 0,01$ с, тогда

$$\tau_i = \frac{T}{2} = \pi\sqrt{LC} \leq 0,01, \quad (1)$$

где T – период разрядного тока, с; L – индуктивность разрядного контура, Гн; C – емкость батареи конденсаторов, Ф.

С другой стороны, при заданных размерах и известных характеристиках металла проволоки, из которой выполнен иницирующий проводник (радиус a , удельная электрическая проводимость σ , плотность ρ , удельная теплоемкость c), время нагрева проволоки импульсом тока от начальной температуры T_0 до температуры иницирования T_i , согласно [3],

$$\tau_i \approx 2 \left(\frac{3\sigma\rho\pi^2 a^4 c L^2 (T_i - T_0)}{2U_0^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

где U_0 – зарядное напряжение, В.

Тогда напряжение U_0 , при котором гарантированно произойдет иницирование процесса СВС для выбранной порошковой системы, определяется выражением [5]

$$U_0 = 2a^2 \sqrt{\frac{3\sigma\rho c (T_i - T_0) \sqrt{L}}{\pi\sqrt{C^3}}}. \quad (3)$$

Учитывая то, что для иницирования необходимо ввести в проволоку запасенную в конденсаторе энергию, которая должна равняться энтальпии H зажигания экзотермической реакции $CU_0^2/2 = H$, в выбранной СВС-системе, получаем выражение для емкости

$$C = 2H / U_0^2. \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (3) и (4) при $\pi\sqrt{LC} \leq 0,01$ с, получим окончательно выражения для расчета электротехнических параметров разрядного контура для иницирования СВС

$$C = \frac{6 \cdot 10^{-3} \cdot a^4 \sigma \rho C (T_i - T_0)}{\pi H}, \quad (5)$$

$$L = \frac{10^{-5}}{C}, \quad (6)$$

$$U_0 = \frac{\pi\sqrt{2H^3}}{6a^4 \sigma \rho c (T_i - T_0) \sqrt{L}}. \quad (7)$$

Для предварительных расчетов параметров разрядного контура инициации СВС УНМ в порошковой системе алюминий + политетрафторэтилен, было использовано значение $T_i \approx 1330$ К, в порошковой системе алюминий + политетрафторэтилен + Fe (5%) – $T_i \approx 1420$ К [6].

Методика измерения параметров волны горения. Основные физико-химические процессы СВС протекают на фронте и в протяженной пространственной зоне за фронтом волны горения. Исследование тепловой структуры этой волны, измерение термограмм горения направлено на физико-химическую классификацию механизма распространения волны.

Измерение температуры с помощью термопар основано на использовании законов термоэлектрических явлений. Визуализация (фотографирование) процесса горения и последующая обработка информации предоставляет данные о стадийности и механизме распространения волны. В нашем случае, измерение параметров процесса горения позволит провести апробацию полученных теоретически выражений, применяя их для расчета параметров разрядного контура иницирования СВС УНМ.

Процесс горения (температуры и скорости распространения фронта горения, динамики волны СВС) изучали по общеизвестной методике, описанной в работах [6-11], используя лабораторную установку, представленную на рис. 1.



Рисунок 1 – Лабораторная установка для реализации СВС

Для измерения температуры использованы термопары вольфрам-рениевые (ТВР) А1 диаметром 450 мкм, для установки которых в камере и капсуле с образцом просверливали отверстия глубиной ~ 2 мм и диаметром 1 мм. Следует отметить, что погрешность высокотемпературных измерений с помощью термопар ТВР А1 в волне СВС составляет от 10 до 50 К [8].

В связи с тем, что термопары ТВР А1 имеют малую величину термоэлектрической движущей силы (т.э.д.с.), сравнимую с уровнем помех на самом осциллографе, было решено усиливать сигналы перед непосредственной подачей на вход осциллографа. Для усиления сигналов применяли аналоговый прецизионный усилитель AD627.

Для калибровки датчика температуры использовали табличные данные для термопар ТВР А1 по ДСТУ 2837-94 (ГОСТ 3044-94), в соответствии с которыми была построена тарировочная кривая, представленная на рис. 2.

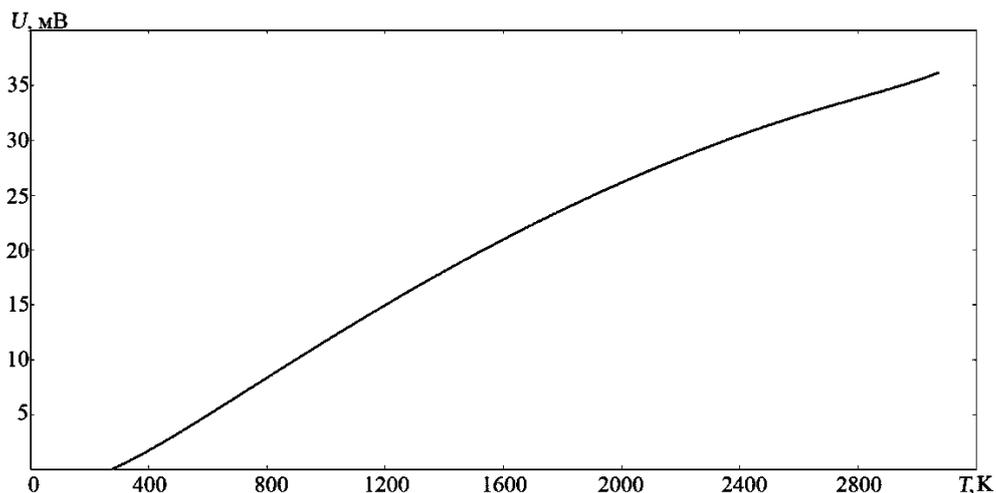


Рисунок 2 – Тарировочная кривая для термопар TBP A1

При помощи электроразрядного импульса иницирующая проволока нагревалась и поджигала образец. В момент подачи разрядного импульса для нагрева шихты включали видеозапись процесса СВС на цифровой фотоаппарат Sony Cyber-shot DSC-H7 и осуществляли регистрацию усиленных сигналов с датчиков температуры (термопар) с помощью осциллографа Wittig Technologies W2012.

Результаты измерения линейной скорости волны горения и температуры горения позволяют рассчитать следующие основные параметры, характеризующие процесс СВС – ширину зоны прогрева x_m , время реакции в волне t_p , время нагревания вещества в волне t_m и скорость нагревания вещества в волне W , используя расчетные формулы, указанные в [6],

$$x_m = \frac{\alpha}{u}, \quad (8)$$

$$t_m = \frac{x_m}{u}, \quad (9)$$

$$t_p = \frac{(L_g - x_m)}{u}, \quad (10)$$

$$W = \frac{(T_2 - T_0)}{t_m}, \quad (11)$$

где α – коэффициент температуропроводности образца, $\text{м}^2/\text{с}$; u – линейная скорость волны горения, $\text{м}/\text{с}$; L_g – длина волны горения, м ; T_0 – начальная температура шихты, К ; T_2 – максимальная температура горения на температурном профиле, К .

Для построения температурного профиля процесса горения, также были рассчитаны коэффициент теплопроводности порошковой смеси $\lambda_{см}$ (по формуле Оделевского [12]) и тепловой поток q :

$$\lambda_{см} = \lambda_1 \left(1 - \frac{y_2}{\frac{1}{1-\nu} - \frac{y_1}{3}} \right), \quad (12)$$

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (13)$$

где λ_1 и y_1 , λ_2 и y_2 – теплопроводность и содержание по объему компонентов смеси; $\nu = \lambda_2/\lambda_1$.

Экспериментальные результаты. Результаты расчетов термодинамических характеристик исходных систем и динамических параметров волн горения для смесей алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + политетрафторэтилен + Fe (5 %) приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1 – Характеристики исходных систем

Система	Al+(-C ₂ F ₄) _n	Al+(-C ₂ F ₄) _n +Fe(5%)
Плотность ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	2356,69	2438,04
Теплоемкость c , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	973,21	948,01
Коэффициент теплопроводности $\lambda_{см}$, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	19,87	20,18
Коэффициент температуропроводности α , $\text{м}^2/\text{с}$	22,42	22,45

Таблица 2 – Параметры волн горения

Система	Al + (-C ₂ F ₄) _n	Al + (-C ₂ F ₄) _n + Fe(5%)
Линейная скорость горения u , $\text{мм}/\text{с}$	26,43	17,38
Температура иницирования T_i , К	1387	1453
Температура горения T_2 , К	2821	2571
Ширина зоны прогрева x_m , мм	0,85	1,29
Общая длина волны L_g , мм	3,8	4,2
Время реакции в волне t_p , с	0,11	0,16

Температурные профили волны горения для смесей алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + политетрафторэтилен + Fe (5%) представлены в виде зависимостей теплового потока от температуры и температуры от времени (рисунок 3).

Исследования структуры волн горения выявили сложную картину фазовых превращений реагентов в процессе СВС и позволили сделать вывод о том, что экзотермические реакции в выбранных системах происходят в жидкофазном состоянии.

Важной характеристикой профиля является температура иницирования T_i , которая делит волну на две зоны – зону прогревания, в которой тепловыделение несущественно, и зону экзотермической реакции.

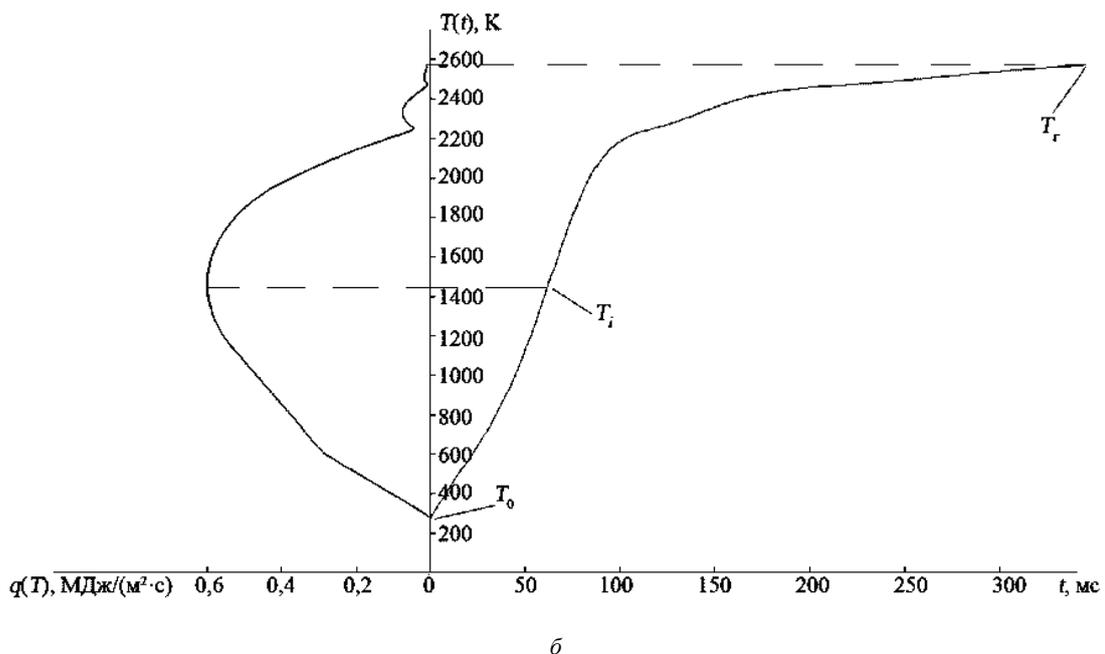
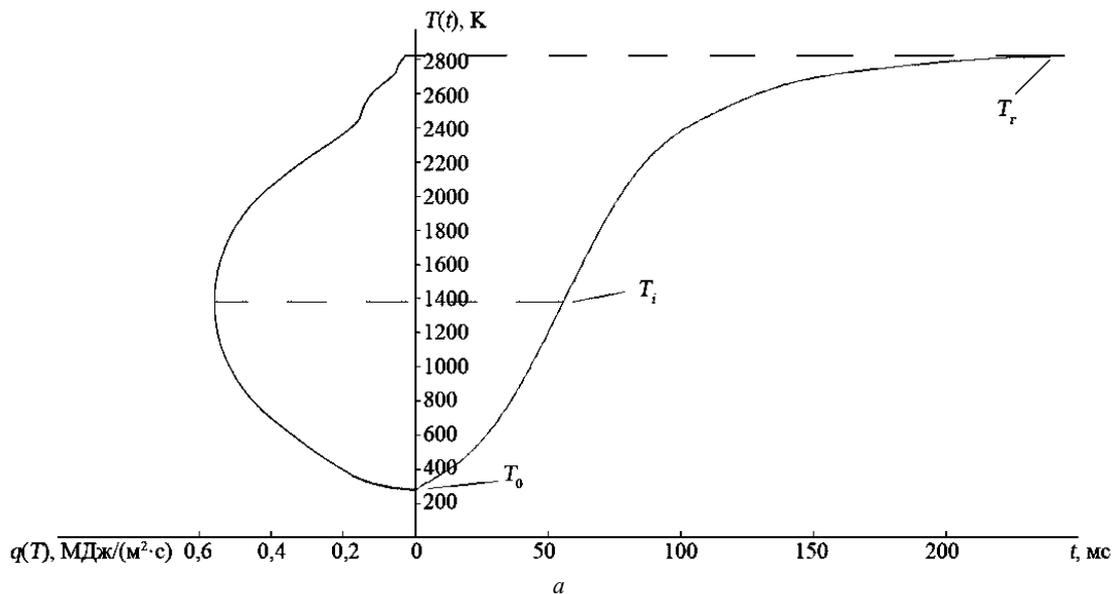


Рисунок 3 – Температурные профили при СВС в порошковых смесях алюминий + политетрафторэтилен (а) и алюминий + политетрафторэтилен + Fe (5%) (б)

На рис. 3 показаны значения температуры инициирования СВС T_i , полученные экспериментально, для порошковой смеси алюминий + политетрафторэтилен – $T_i = 1387$ К, для смеси алюминий + политетрафторэтилен + Fe (5%) – $T_i = 1453$ К. Различие между рассчитанными теоретически и полученными экспериментально температурами инициирования составляет меньше 5 %.

Выводы. Получены аналитические зависимости параметров разрядного контура от термодинамических параметров порошковых систем исходных реагентов (температура инициирования и энтальпия экзотермической реакции).

С помощью вольфрам-ренийевых термопар получены термограммы волн горения, по которым рассчитаны параметры процесса СВС в выбранных порош-

ковых системах (температуры горения, линейная скорость горения, ширина зоны прогрева, времена реакции и нагревания вещества в волне и др.).

На основе экспериментальных данных о параметрах волны горения и рассчитанных параметров порошковых смесей (теплоемкость, коэффициенты тепло- и температуропроводности, объемные составляющие реагирующих компонентов) построены температурные профили волн горения в виде зависимостей теплового потока от температуры и температуры от времени для смесей алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + политетрафторэтилен + Fe (5%).

Список литературы: 1. Kamat P. Carbon nanomaterials: building blocks in energy conversion devices / P. Kamat // Electrochem. Soc. Interface. – 2006. – Vol. 15, № 1. – P. 45–47. 2. Челтанов Д. И. Разрядноимпульсная инициация процессов

самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в некоторых порошковых системах / Д. И. Челпанов, Н. И. Кускова, А. А. Смалко // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. праць. – 2015. – № 51. – С. 115–120. 3. **Бакларь В. Ю.** Электрофизические параметры синтеза углеродных наноструктур в процессе электровзрыва / В. Ю. Бакларь, Н. И. Кускова, С. А. Хайнацкий // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. праць. – 2014. – № 50. – С. 3–12. 4. **Бакларь В. Ю.** Математическая модель процесса электровзрыва цилиндрических проводников / В. Ю. Бакларь, Н. И. Кускова, Д. И. Челпанов // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. праць. – 2015. – № 51. – С. 3–7. 5. Заявка № u201508493 Україна; МПК (2015.01) C01B31/02, B82B3/00, B22F3/23. Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів / Д. І. Челпанов, Н. І. Кускова, А. О. Смалко; заявник і патентовласник Ін-т імпульсних процесів і технологій НАН України; заявл. 31.08.15; рішення про видачу патенту від 02.12.15. 6. **Амосов А. П.** Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: Учеб. пособие / А. П. Амосов, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов; под научной редакцией В. Н. Анциферова. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 471 с. 7. **Левашов Е. А.** Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Е. А. Левашов, А. С. Рогачев, В. И. Юхвид, И. П. Боровинская. – М.: БИНОМ, 1999. – 176 с. 8. **Рогачев А. С.** Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетiku / А. С. Рогачев, А. С. Мукасян. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 400 с. 9. **Мержанов А. Г.** Твердотопламенное горение / А. Г. Мержанов. – Черноголовка: ИСМАН, 2000. – 224 с. 10. **Мержанов А. Г.** Твердотопламенное горение / А. Г. Мержанов, А. С. Мукасян. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. – 336 с. 11. **Левашов Е. А.** Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Е. А. Левашов, А. С. Рогачев, В. В. Курбаткина, Ю. М. Максимов, В. И. Юхвид. – М.: Изд. дом «МИСиС», 2011. – 377 с. 12. **Шелудяк Ю. Е.** Теплофизические свойства компонентов горючих систем / Ю. Е. Шелудяк, Л. Я. Кашпоров, Л. А. Малинин, В. Н. Цалков. – М.: НПО «Информ ТЭИ», 1992. – 184 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kamat P. Carbon nanomaterials: building blocks in energy conversion devices. P. Kamat. Electrochem. Soc. Interface. 2006. Vol. 15, No 1. P. 45–47. 2. Chelpanov D. I. Razrjadnoimpul'snaja iniciacija processov samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnogo sinteza v nekotoryh poroshkovyh sistemah. D. I. Chelpanov, N. I. Kuskova, A. A. Smal'ko. Visnik NTU «KhPI». Ser. Tehnika ta elektrofizikavisokihnuprug: zb. nauk. prac'. 2015. No 51. pp. 115–120. 3. Baklar V. Ju. Jelektrofizicheskie parametry sinteza uglerodnyh nanostruktur v processe jelektrovzryva. V. Ju. Baklar, N. I. Kuskova, S. A. Hajnackij. Visnik NTU «KhPI». Ser. Tehnika ta elektrofizikavisokihnuprug: zb. nauk. prac'. 2014. No 50. pp. 3–12. 4. Baklar V. Ju. Matematicheskaja model' processa jelektrovzryva cilindricheskih provodnikov. V. Ju. Baklar, N. I. Kuskova, D. I. Chelpanov. Visnik NTU «KhPI». Ser. Tehnika ta elektrofizikavisokihnuprug: zb. nauk. prac'. 2015. No 51. pp. 3–7. 5. Zajavka № u201508493 Ukrainina; MPK (2015.01) C01B31/02, B82B3/00, B22F3/23. Sposib oderzhannya vuglecevyh nanomaterialiv. D. I. Chelpanov, N. I. Kuskova, A. O. Smal'ko; zavavnyk i patentovlasnyk In-t impul'snyh procesiv i tehnologij NAN Ukrainy; zavavl. 31.08.15; rishennya pro vydachu patentu vid 02.12.15. 6. Amosov A. P. Poroshkovaja tehnologija samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnogo sinteza materialov: Ucheb. posobie. A. P. Amosov, I. P. Borovinskaja, A. G. Merzhanov; pod nauchnoj redakciej V. N. Anciferova. Moscow: Mashinostroenie-1, 2007. 471 p. 7. Levashov E. A. Fiziko-himicheskie i tehnologicheskie osnovy samorasprostranjaju-shhegosja vysokotemperaturnogo sinteza. E. A. Levashov, A. S. Rogachev, V. I. Juhvid, I. P. Borovinskaja. Moscow: BINOM, 1999. 176 p. 8. Rogachev A. S. Gorenje dlja sinteza materialov: vvedenie v strukturuju makrokinetiku. A. S. Rogachev, A. S. Mukas'jan. Moscow: Fizmatlit, 2012. 400 p. 9. Merzhanov A. G. Tverdoplamennoe gorenje. A. G. Merzhanov. Chernogolovka: Isman, 2000. 224 p. 10. Merzhanov A. G. Tverdoplamennoe gorenje. A. G. Merzhanov, A. S. Mukas'jan. Moscow: Torus press, 2007. 336 p. 11. Levashov E. A. Perspektivnye materialy I tehnologii samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnogo sinteza. E. A. Levashov, A. S. Rogachev, V. V. Kurbatkina, Ju. M. Maksimov, V. I. Juhvid. Moscow: Izd. dom «MISiS», 2011. 377 p. 12. Sheludjak Ju. E. Teplofizicheskie svojstva komponentov gorjuchih sistem. Ju. E. Sheludjak, L. Ja. Kashporov, L. A. Malinin, V. N. Calkov. Moscow: NPO «Inform TJeI», 1992. 184 p.

Поступила (received) 23.12.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Челпанов Дмитрий Ильич, аспирант; Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, тел.: (067) 514-77-78; email: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Chelpanov Dmitry Ilyich, Postgraduate Student; Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (067) 514-77-78; email: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Бакларь Виктор Юрьевич, младший научный сотрудник; Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, тел.: (050) 864-26-23; email: baklarv@gmail.com.

Baklar Viktor Yurjevich, Research Assistant; Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (050) 864-26-23; email: baklarv@gmail.com.

Кускова Наталья Ивановна, доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований Института импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины; тел.: (050) 737-94-52; email: nataljakuskova@mail.ru.

Kuskova Natalya Ivanovna, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electrophysical Researches of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; email: nataljakuskova@mail.ru.

Корзинова Анна Николаевна, аспирант; Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, тел.: (093) 227-17-93; email: maluchek@i.ua

Korzinova Anna Nikolaevna, Postgraduate Student; Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (093) 227-17-93; email: maluchek@i.ua.

РЕФЕРАТИ

УДК 620.179.14

Динамічні характеристики магнітопружних перетворювачів / М.Л.Антонов, В.Ф.Безотосний, В.В.Козлов, О.В.Набокова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 5-9. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

У роботі показано, що тривалість перехідних процесів у магнітопружних перетворювачах може бути зменшена до значень, які не перевищують тривалості розповсюдження механічних напруг у об'єкті дослідження, і це може бути досягнуто правильним вибором кількості витків і частоти намагнічувального струму. Це дозволяє використовувати магнітопружні перетворювачі для контролю високочастотних динамічних процесів, а вибір раціональних параметрів МП дозволяє зменшити похибку вимірювань. Для збереження чутливості МП слід підвищувати частоту намагнічувального струму, а при розрахунках слід враховувати поверхневий ефект, що можливо використанням фіктивної магнітної проникності. Додатковими дослідженнями встановлено, що при проектуванні МП потрібне знання припустимої межі міцності матеріалу магнітопроводу, облік анізотропії матеріалу, початкової магнітної проникності та магнітострикції. Прикладом практичного використання наведених досліджень є розроблена система, яка вирішує завдання неруйнуючого експрес контролю феромагнітних матеріалів і конструкцій по визначенню механічних напруг, виникнення яких обумовлено дією експлуатаційних і технологічних факторів.

Ключові слова: магнітопружний перетворювач, перехідний процес, механічні напруги, постійна часу, динамічна характеристика.

УДК 621.3.022:537.311.8:316

Розрахункова оцінка електротермічної стійкості кабельно-провідникової продукції об'єктів електроенергетики до впливу індуктованого потужною електромагнітною завадою наносекундного імпульсу струму / М.І. Баранов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 10-14. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведені результати розрахункової оцінки електротермічної стійкості дротів і кабелів з мідними (алюмінієвими) жилами, полівінілхлоридною (ПВХ) і поліетиленовою (ПЕТ) ізоляцією первинних (вторинних) електричних кіл об'єктів електроенергетики до дії на них аперіодичного імпульсу струму часової форми 5/50 нс з амплітудою (1-100) кА, протікання якого викликане зовнішньою потужною електромагнітною завадою штучного походження із заданими амплітудно-часовими параметрами (АЧП). Визначені максимальні чисельні значення гранично допустимої і критичної щільності вказаного заводного наносекундного імпульсу струму з прийнятими АЧП в даних дротах (кабелях) без твердої ізоляції, з ПВХ і ПЕТ ізоляцією електричних кіл енергооб'єктів.

Ключові слова: зовнішня потужна електромагнітна завада; дроти і кабелі електричних кіл об'єктів електроенергетики; електротермічна стійкість кабельно-провідникової продукції первинних і вторинних електричних кіл енергооб'єктів; гранично допустима і критична щільність імпульсу струму аперіодичної часової форми 5/50 нс в дротах і кабелях електрокіл енергооб'єктів.

УДК 621.314.5:537.523:661.666.4

Дослідження електрофізичних характеристик високовольтної обробки газоподібних вуглеводнів для отримання вуглецевих наноматеріалів / Л. З. Богуславський, Д. В. Вінниченко, Н. С. Назарова, Ю. О. Адамчук, С. В. Чущак // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 15-19. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведено дослідження електрофізичних характеристик режиму продуктивного синтезу нановуглецю. Визначено типові форми динамічних вольт-амперних характеристик, при яких здійснюється синтез вуглецевих наноматеріалів, та їх залежність від потужності в каналі розряду і довжини міжелектродного проміжку. Визначено функціонали, які характеризують форму розрядних імпульсів. На основі їх аналізу визначено найбільш інформативну характеристику для моніторингу довжини міжелектродного проміжку.

Ключові слова: електрофізичні характеристики, високовольтна обробка, газоподібні вуглеводні, синтез нановуглецю.

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Електростатичні фільтри димових газів теплових електростанцій як навантаження джерел комбінованого живлення / Л. З. Богуславський, В. В. Діордійчук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 20-23. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто питання зміни характеру навантаження систем комбінованого живлення електростатичного фільтра в процесі уловлювання пилу с відомим питомим електричним опором при формуванні слабопровідного шару на поверхні осаджуючого електрода. Встановлено взаємозв'язок величини напруги, що прикладається до газового проміжку, від товщини шару осадженого пилу, що дозволяє роботи висновок про інтенсивність коронного розряду в даних умовах та режимі джерела живлення постійної напруги. Встановлено характер зміни електричної ємності електродної системи в залежності від товщини шару пилу, що осів.

Ключові слова: електростатична фільтрація, товщина шару пилу, комбіноване живлення, ефект закривання коронного розряду.

УДК 621.317

Перевірка стану системи зрівнювання потенціалів енергооб'єктів / О. Ю. Глебов, С. В. Киприч, Г. М. Колишко, А. В. Пличко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 23-29. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Наведено основні вимоги нормативних документів, які пред'являються до основної та додаткової систем зрівнювання

потенціалів (СЗП). Показано, що можна використовувати у якості захисних провідників СЗП, їх переріз, яким чином прокласти та виконувати з'єднання та приєднання захисних провідників. Наведений перелік документів, які передаються монтажною організацією при передаванні електроустановки до експлуатації, зміст паспорту на заземлювальний пристрій (ЗП) електроустановок. Описані заходи, що призначені для перевірки стану СЗП. Наведені приклади проведення перевірок СЗП. Сформульовані основні недоліки виконання СЗП. Основний висновок: перевірку стану СЗП доцільно суміщати із перевіркою ЗП та СБЗ.

Ключові слова: електробезпека, заземлення, зрівнювання потенціалів, випробування електроустановок.

УДК 621.316.933.6:622.276.6

Дослідження напруги спрацьовування високовольтних газонаповнених некерованих розрядників електророзрядних занурювальних установок / В. Г. Жекул, Ю. І. Мельхер, С. Г. Поклонов, О. П. Смирнов, І. С. Швець // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 30-33. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

У роботі виконано експериментальне дослідження впливу параметрів технологічних режимів роботи електророзрядної занурювальної установки (зміна частоти розрядів від 0,2 до 2 Гц, температури навколишнього середовища від 10 °С до 90 °С, кількості розрядів) на величину напруги спрацьовування його високовольтного газонаповненого некерованого розрядника. Показано, що вплив зазначених параметрів може бути значним і вимагає введення циклічних режимів роботи електророзрядної занурювальної установки для підвищення ефективності обробки свердловин.

Ключові слова: електророзрядна занурювальна установка, високовольтний розрядник, температура навколишнього середовища, частота слідування розрядів.

УДК 53.084.4:537.528

Комплексна методика калібрування засобів вимірювання електричних процесів при високовольтному розряді в рідині / В. Г. Жекул, С. Г. Поклонов, О. П. Смирнов, В. С. Макаренко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 34-39. – Бібліогр.: 22 назв. – ISSN 2079-0740.

У роботі запропонована комплексна методика калібрування засобів вимірювання електричних процесів (тривалістю від 10 мкс до 100 мкс, амплітудне значення розрядного струму 10^4 - 10^5 А, зарядна напруга десятки кіловольт) при електричному розряді в рідині. Вона дозволяє виконати калібрування і перевірку засобів вимірювання на режимах близьких за своїми параметрами до вимірюваних в процесі проведення експериментальних робіт, знизити ймовірність помилки, зменшити похибку процесу калібрування, а також періодично здійснювати перевірку коефіцієнта вже повірених засобів вимірювання безпосередньо в процесі проведення експериментальних досліджень.

Ключові слова: високовольтний розряд в рідині, розрядний струм, напруга на розрядному проміжку, коаксіальний омичний шунт, дільник напруги, котушка Роговського.

УДК 621.317.3

Реалізація локальної системи попередження про грозову небезпеку / В. В. Князев, І.О.Постільник // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 39-43. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Представлені результати розробки локальної системи попередження про грозову небезпеку, яка здійснюється за схемою «знизу-вгору». Така схема має суттєві переваги у порівнянні з аналогічними системами, які функціонують в країнах G20. Перевага досягається за рахунок установки великого числа простих і дешевих локальних елементів, які об'єднуються в багаторівневу мережу за допомогою передачі даних через стільникові мережі та Інтернет. Тільки така концепція побудови забезпечує можливість створення системи оперативного попередження.

Ключові слова: грозова небезпека, локальна система попередження, індикатор грозовий небезпеки.

УДК 537.8 : 537-7

Високовольтна система живлення магнітної системи електрофізичної установки для отримання та дослідження багатокомпонентної газометалевої плазми / Ю. В. Ковтун, Є. В. Сюсько // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 44-48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

В роботі розглянута високовольтна система живлення магнітної системи електрофізичної установки для отримання та дослідження багатокомпонентної газометалевої плазми. Описані конструкційні особливості імпульсної високовольтної системи живлення магнітної системи електрофізичної установки. Отримані розрахункові і експериментальні залежності розрядного струму через магнітну систему від часу. Розглянута можливість зміни форми імпульсу струму через магнітну систему та наближенні її до прямокутної.

Ключові слова: магнітна система, струм, напруга, розряд, електрична схема, індуктивність, опір, ємність.

УДК 621.318

Взаємодія власних коливань двовимірної(2D) електронного газу з потоком заряджених частинок в умовах дії електромагнітного випромінювання / В.И. Кравченко, О.А Серков, В.С. Бреславец, І.Л. Яценко, І.В Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 49-52. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

В роботі отримано кінетичне рівняння для поверхневих плазмонів 2D системи, що описує їх взаємодію з електронним потоком, що рухається по нормалі до межі поділу середовищ. Передбачається, що газ локалізовано поблизу дельтоподібної потенційної ями. Знайдено інкремент нестійкості. Величина інкремента обернено пропорційна часу прольоту частинок крізь 2D електронну систему. Отримано аналітичні рішення задач взаємодії струмів, наведених зовнішнім електромагнітним випромінюванням, з власними електромагнітними коливаннями структур комплектуючих напівпровідникові прилади, в умовах режиму нестійкості (генерації) коливань. Визначено розрахункові співвідношення для кількісних характеристик зворотних відмов (ступеня відхилення ВАХ від норми) напівпровідникових приладів в залежності від параметрів зовнішнього електро-

магнітного випромінювання і фізичних якостей матеріалів, комплектуючих приладів.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, безіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості, генерування, черенковське та перехідне випромінювання, гелікони, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

УДК 621.318

Вплив потенційного бар'єру на процеси взаємодії плазмонів і заряджених частинок на кордоні розділу середовищ / В.І. Кравченко, О.А. Серков, В.С. Бреславець, І.Л. Яценко, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 53-56. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Визначено ймовірності процесів випромінювання і поглинання енергії електромагнітних коливань електронами пучка на кордоні провідного твердого тіла з урахуванням потенційного бар'єру кінцевої величини, розглянуто можливість розвитку нестійкості коливань. Враховано вплив кінцевої величини потенційного бар'єру на механізм обміну енергією хвиль і частинок на кордоні. Отримано кінетичні рівняння, що визначають зміну числа поверхневих плазмонів, вирази для інкрементів їх неустойчивостей з урахуванням величини потенційного бар'єру на кордоні, яку перетинає потік заряджених частинок. Дані результати дозволяють враховувати внесок відбитої та компоненти, що пройшла потоку частинок в сумарну енергію випромінювання поверхневих коливань.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, безіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості, генерування, черенковське та перехідне випромінювання, гелікони, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

УДК 621.318

Збудження поверхневих плазмонів при наявності потенційного бар'єру в умовах впливу електромагнітного випромінювання / В.І. Кравченко, О.А. Серков, В.С. Бреславець, І.Л. Яценко, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 56-60. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто взаємодію поверхневих плазмонів з потоком заряджених частинок при наявності потенційного бар'єру, виходячи з енергетичного принципу отримані кінетичні рівняння, що визначають зміну числа поверхневих плазмонів, вирази для інкрементів їх нестійкостей з урахуванням величини потенційного бар'єру на кордоні, який призводить до появи відбитих від кордону частинок пучка. Отримані результати дозволяють враховувати внесок відбитої і компоненти, що пройшла, потоку частинок у сумарну енергію випромінювання поверхневих коливань. Досліджено механізми взаємодії потоку заряджених частинок з власними електромагнітними коливаннями двовимірного електронного газу, виникнення якого обумовлено наявністю потенційного бар'єру на межі поділу середовищ.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, безіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості, генерування, черенковське та перехідне випромінювання, гелікони, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

УДК 621.318

Кінетична стійкість поверхневих плазмонів при наявності потенційного бар'єру на межі поділу середовищ / В.І. Кравченко, О.А. Серков, В.С. Бреславець, І.Л. Яценко, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 60-64. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто взаємодію поверхневих плазмонів з потоком заряджених частинок при наявності потенційного бар'єру, виходячи з енергетичного принципу отримані кінетичні рівняння, що визначають зміну числа поверхневих плазмонів, вирази для інкрементів їх нестійкостей з урахуванням величини потенційного бар'єру на межі, який призводить до появи відбитих від межі частинок пучка. Отримані результати дозволяють враховувати внесок відбитої та компоненти, що пройшла, потоку частинок в сумарну енергію випромінювання поверхневих коливань. Досліджено механізми взаємодії потоку заряджених частинок з власними електромагнітними коливаннями двовимірного електронного газу, виникнення якого обумовлено наявністю потенційного бар'єру на межі поділу середовищ.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, безіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості, генерування, черенковське та перехідне випромінювання, гелікони, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

УДК 621.317.3

Установка для випробувань технічних засобів на стійкість до магнітних полів частоти мережі У-МПЧС / Ю. С. Немченко, В. В. Князев, І. П. Лесной, С. Б. Сомхіїв // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 65-69. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Описано конструкцію та результати атестації установки, призначеної для випробувань настільних малогабаритних та підлогових великогабаритних електротехнічних і електронних виробів, устаткування і апаратури, які в процесі експлуатації можуть піддаватися дії магнітних полів частоти мережі (тривалий або короткочасний). Випробування проводяться за п'ятьма випробувальними рівнями в тривалому режимі і за двома випробувальними рівнями в короткочасному режимі відповідно до ДСТУ ІЕС 61000-4-8:2012.

Ключові слова: випробування, магнітні поля частоти мережі, технічні засоби, установка, атестація.

УДК 621.74.046 : 004

Ефективність застосування 3D-принтера ProJet460 Plus в серійному виробництві виробів методом точного литва / В. А. Олейник, О. М. Сизоненко, Г. Ф. Мьяльниця // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 70-73. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянута можливість підвищення технологічності процесу точного лиття у серійному виробництві підприємства за рахунок повномасштабного впровадження технології швидкого прототипування на базі 3D-принтера ProJet460 Plus. Перехід

на виготовлення керамічних стрижнів охолоджуваних лопаток ГТД методом 3D-друку дозволяє знизити кількість технологічних операцій та скоротити час, необхідний для усунення недоліків у випадку їх виявлення при випробуваннях.

Ключові слова: 3D-принтер, 3D-друк, адитивні технології, трьохвимірний друк, стрижні охолоджуваних лопаток.

УДК 551.594

Моделювання ураження стрижня розрядом довгої іскри з використанням багатокрокової моделі / О. О. Петков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 73-77. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Розроблено багатокрокову модель для визначення ймовірності ураження стрижневого електрода, розташованого на площині, у полеутворювальній системі електродів «стрижень – площина». Показано, що запропонована модель дозволяє адекватно описувати ймовірність ураження стрижневого об'єкта в розрядному проміжку довжиною $H = 3 - 15$ м при співвідношенні розташування електродів-стрижнів у полеутворювальній системі. Близькі значення варіативного параметра K_{st} при моделюванні спостережуваних в експериментах значеннях ймовірності ураження $p^* = 1$ дозволяють вважати однаковими процеси, які приводять до ураження стрижня поза залежністю від розмірів електродної системи й параметрів імпульсів напруги, застосовуваних при випробуваннях. Матеріали роботи можуть бути використані для подальших досліджень ураження довгою іскрою об'єктів, розташованих на плоскій поверхні.

Ключові слова: математична модель, ймовірність ураження, довірчий інтервал, розряд довгої іскри.

УДК 534.231/534-16 : 621.373

Особливості розрахунку змінного магнітного поля, що створює феромагнітний диск під час вібрації / О.М. Петрищев, В.В. Пілінський, О.С. Чупахін // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 78-81. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Показано, що джерелами низькочастотних електромагнітних завад можуть бути металеві елементи радіоелектронної апаратури, які здійснюють механічні коливання (вібрують) в присутності постійного магнітного поля. В даній роботі на прикладі віброуючого феромагнітного диску, розглянуто послідовність обчислювальних процедур, що дозволяє визначити амплітуду змінної намагніченості віброуючого диску та рівень змінного магнітного поля в навколишньому просторі.

Ключові слова: електромагнітна обстановка; джерело завад; звуковий діапазон; механічні вібрації; магнітне поле; феромагнітний диск.

УДК 539.3

Метод маршрутизації в бездротовій самоорганізуючійся мережі на основі апарату нечіткої логіки / И. А. Потапчук, А. В. Багрянцева // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 82-88. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Розроблені та досліджені модель та метод застосування нечіткої логіки для вирішення завдань маршрутизації в БСС-мережах. Запропоновано модифікований метод маршрутизації для БСС-мережі, що базується на апараті нечіткої логіки. Розроблено загальну структуру контролера нечіткої логіки, визначені вхідні та вихідні параметри. Проведено порівняльний аналіз запропонованого методу з класичним AODV.

Ключові слова: бездротові мережі, маршрутизація, нечітка логіка, нечіткий контролер, нечіткі дані про стан радіолінії, QoS, FAODV.

УДК 621.372

Особливості забезпечення ЕМС гібридних систем у ЛЕП / А.Ф. Розвадовський, В.С. Лазебний, В.В.Пілінський // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 89-93. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто приклад схеми організації комбінованого передавання даних через проводи ЛЕП, та інтерференційні завади, які виникають під час цього процесу. З метою зниження рівня завад запропоновано доповнити і проводові-безпроводові PLC системи додатковими загороджувальними фільтрами на основі паралельного коливального контуру. Виконано моделювання амплітудно-частотних характеристик даних фільтрів з урахуванням схем заміщень з регулярними та паразитними параметрами та запропоновано рекомендації щодо їх застосування.

Ключові слова: PLC, безпроводове передавання, інтерференція, протизавадові фільтри, моделювання, ЕМС.

УДК 681.5

Інтелектуальний метод оцінки стану здоров'я людини / Н. В. Савченко, Д. А. Панасенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 93-96. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

На основі побудови формалізованих моделей для захворювань печінки (хронічний гепатит і цироз), описана залежність результуючого діагнозу від результатів обстеження пацієнта, яка реалізована в програмі. Представлено етапи отримання моделей, а також наведені експериментальні вагові коефіцієнти, використовувани при побудові моделі. Всього моделей із зазначеними характеристиками 33.

Ключові слова: хронічний гепатит, цироз, діагноз, математичне моделювання, модель множинної регресії, програмний продукт.

УДК 621.762.3: 537.528

Вплив складу робочого середовища на швидкість фронту хвилі тиску високовольтного електричного розряду / А.С. Торпаков, О.М. Сизоненко, Е.І. Тафтай // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 97-101. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

Наведені результати експериментальних досліджень швидкості фронту хвилі тиску за допомогою хвилеводного п'єзоелектричного датчику при високовольтному електричному розряді у воді, у воді з додаванням порошку Ti , у гасі та у

гасі з додаванням порошку Ti. Експериментально встановлені умови формування ударної хвилі та зв'язок швидкості фронту хвилі тиску з дисперсійним середовищем, кількістю дисперсної фази та параметрами розрядного контуру при ВЕР у дисперсійній системі «порошок – рідина».

Ключові слова: електричний розряд, порошок титану, швидкість фронту, ударна хвиля, дисперсна система.

УДК 537.528

Деякі інваріанти електричного вибуху провідників в оптимальних режимах / С. О. Хайнацький // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 102-106. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Отримані деякі інваріанти електричного вибуху провідників в оптимальних режимах, коли вся запасена енергія виділяється у першому напівперіоді. Показано, що в оптимальних режимах ряд співвідношень - відношення запасеної енергії до маси провідника, до енергії сублимації, відношення хвильового опору розрядного контуру до початкового омичного опору провідника, не залежать від параметрів контуру та розмірів провідників. Визначено середнє значення відношення початкової напруги до довжини провідника, яке залежить лише від власної частоти розрядного контуру. Встановлено межі застосовності моделі однорідного вибуху провідників.

Ключові слова: електричний вибух провідників, оптимальний режим, інваріанти подоби, електророзрядний контур.

УДК 621.314:621.373

Стационарний режим коливань магнітного генератора імпульсів при роботі на неузгоджене навантаження / О.І. Христо, Н.І. Кускова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 106-111. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

У роботі розглянуто стаціонарний режим коливань одноключового магнітно-напівпровідникового генератора імпульсів при роботі на неузгоджене навантаження. Проведено чисельне моделювання періодичних електромагнітних процесів в ланцюгах генератора. Отримано аналітичні вирази, що дозволяють якісно і кількісно описати перехідний процес на кожному інтервалі окремо. Визначено умови існування режиму стаціонарних коливань на неузгоджене навантаження, коли період комутації ключа є сумірним з періодом затухаючих коливань електромагнітного процесу зворотного перемагнічування.

Ключові слова: магнітний генератор імпульсів, комутуючий дросель, чисельне моделювання.

УДК 537.52:542.9:661.66

Умови розрядної імпульсної ініціювання і параметри процесу самопоширюваного високотемпературного синтезу вуглецевих наноматеріалів / Д. І. Челпанов, В. Ю. Бакларь, Н. І. Кускова, А. М. Корзинова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 112-116. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Отримані аналітичні залежності параметрів розрядного контуру від термодинамічних характеристик порошкових систем початкових реагентів. Розраховані електротехнічні параметри для ініціювання процесу самопоширюваного високотемпературного синтезу вуглецевих наноматеріалів в системах порошоків складом алюміній + політетрафторетилен та алюміній + політетрафторетилен + залізо. Проведені експериментальні дослідження процесу самопоширюваного високотемпературного синтезу в обраних порошкових системах. Побудовані температурні профілі для хвиль горіння в обраних порошкових системах, котрі представлені у вигляді залежностей теплового потоку від температури та температури від часу.

Ключові слова: електророзрядний контур, розрядної імпульсне ініціювання, самопоширюваний високотемпературний синтез, вуглецеві наноматеріали, вуглецеві нанотрубки.

РЕФЕРАТЫ

УДК 620.179.14

Динамические характеристики магнитоупругих преобразователей / Н.Л.Антонов, В.Ф.Безотосный, В.В.Козлов, О.В.Набокова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 5-9. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

В работе показано, что продолжительность переходных процессов в магнитоупругих преобразователях может быть уменьшена до значений, которые не превышают продолжительности распространения механических напряжений в объекте исследования, и это может быть достигнуто подбором количества витков и частоты намагничивающего тока. Это позволяет использовать магнитоупругие преобразователи для контроля высокочастотных динамических процессов, а выбор рациональных параметров МП позволяет уменьшить погрешность измерений. Для сохранности чувствительности МП нужно повышать частоту намагничивающего тока, а при расчетах нужно учитывать поверхностный эффект, что возможно использованием фиктивной магнитной проницаемости. Дополнительными исследованиями установлено, что при проектировании МП необходимо знание допустимой границы прочности материала магнитопровода, учет анизотропии материала, начальной магнитной проницаемости и магнитострикции. Примером практического использования приведенных исследований есть разработанная система, которая решает задачу неразрушающего экспресс-контроля ферромагнитных материалов и конструкций по определению механических напряжений, возникновение которых обусловлено действием эксплуатационных и технологических факторов.

Ключевые слова: магнитоупругий преобразователь, переходной процесс, механические напряжения, постоянная времени, динамическая характеристика.

УДК 621.3.022:537.311.8:316

Расчетная оценка электротермической стойкости кабельно-проводниковой продукции объектов электроэнергетики к воздействию индуцированного мощной электромагнитной помехой наносекундного импульса тока / М.И. Баранов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 10-14. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведены результаты расчетной оценки электротермической стойкости проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами, поливинилхлоридной (ПВХ) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией первичных (вторичных) электрических цепей объектов электроэнергетики к воздействию на них аperiodического импульса тока временной формы 5/50 нс с амплитудой (1-100) кА, протекание которого вызвано внешней мощной электромагнитной помехой искусственного происхождения с заданными амплитудно-временными параметрами (АВП). Определены максимальные численные значения предельно допустимых и критических плотностей указанного помехового наносекундного импульса тока с принятыми АВП в рассматриваемых проводах (кабелях) без твердой изоляции, с ПВХ и ПЭТ изоляцией электрических цепей энергообъектов.

Ключевые слова: внешняя мощная электромагнитная помеха; провода и кабели электрических цепей объектов электроэнергетики; электротермическая стойкость кабельно-проводниковой продукции первичных и вторичных электрических цепей энергообъектов; предельно допустимые и критические плотности импульса тока аperiodической временной формы 5/50 нс в проводах и кабелях электроцепей энергообъектов.

УДК 621.314.5:537.523:661.666.4

Исследование электрофизических характеристик высоковольтной обработки газообразных углеводородов для получения углеродных наноматериалов / Л. З. Богуславский, Д. В. Винниченко, Н. С. Назарова, Ю.О. Адамчук, С. В. Чуцак // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 15-19. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведено исследование электрофизических характеристик режима продуктивного синтеза наноуглерода. Определены типовые формы динамических вольт-амперных характеристик, при которых осуществляется синтез углеродных наноматериалов, и их зависимость от мощности в канале разряда и длины межэлектродного промежутка. Определены функционалы, характеризующие форму разрядных импульсов. На основе их анализа определена наиболее информативная характеристика для мониторинга длины межэлектродного промежутка.

Ключевые слова: электрофизические характеристики, высоковольтная обработка, газообразные углеводороды, синтез наноуглерода.

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Электростатические фильтры дымовых газов тепловых электростанций как нагрузка источников комбинированного питания / Л. З. Богуславский, В. В. Диордийчук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 20-23. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрены вопросы изменения характера нагрузки систем комбинированного питания электростатических фильтров в процессе улавливания пыли с известными значениями удельного электрического сопротивления при формировании слабопроводящего слоя на поверхности осадительного электрода. Установлена взаимосвязь величины напряжения прикладываемого к газовому промежутку с толщиной слоя осевшей пыли, позволяющая судить о интенсивности коронного разряда в данных условиях и режиме работы источника питания постоянного напряжения. Установлен характер изменения электрической емкости электродной системы в зависимости от толщины слоя осевшей пыли.

Ключевые слова: электростатическая фильтрация, толщина слоя пыли, комбинированное питание, эффект запираания коронного разряда.

УДК 621.317

Проверка состояния системы уравнивания потенциалов энергообъектов / О. Ю. Глебов, С. В. Киприч, Г. М. Колиушко, А. В. Пличко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП»,

2016. – № 14 (1186). – С. 23-29. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведены основные требования нормативных документов, предъявляемые к основной и дополнительной системам уравнивания потенциалов (СУП). Показано, что можно использовать в качестве защитных проводников СУП, их сечение, каким образом прокладывать и выполнять соединение и присоединение защитных проводников. Приведен перечень документов, передаваемых монтажной организацией при передаче электроустановки в эксплуатацию, содержание паспорта на заземляющее устройство (ЗУ) электроустановок. Описаны мероприятия, предназначенные для проверки состояния СУП. Приведены примеры проведения проверок СУП. Сформулированы основные недостатки выполнения СУП. Основной вывод: проверку состояния СУП целесообразно совмещать с проверкой ЗУ и СМЗ.

Ключевые слова: электробезопасность, заземление, уравнивание потенциалов, испытание электроустановок.

УДК 621.316.933.6:622.276.6

Исследования напряжения срабатывания высоковольтных газонаполненных неуправляемых разрядников электроразрядных погружных установок / В. Г. Жекул, Ю. И. Мельхер, С. Г. Поклонов, А. П. Смирнов, И. С. Швец // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 30-33. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

В работе выполнено экспериментальное исследование влияния параметров технологических режимов работы электроразрядной погружной установки (изменение частоты следования разрядов от 0,2 до 2 Гц, температуры окружающей среды от 10 °С до 90 °С, количества разрядов) на величину напряжения срабатывания его высоковольтного газонаполненного неуправляемого разрядника. Показано, что влияние указанных параметров может быть существенным и требующим введения циклических режимов работы электроразрядной погружной установки для повышения эффективности обработки скважин.

Ключевые слова: электроразрядная погружная установка, высоковольтный разрядник, температура окружающей среды, частота следования разрядов

УДК 53.084.4:537.528

Комплексная методика калибровки средств измерения электрических процессов при высоковольтном разряде в жидкости / В. Г. Жекул, С. Г. Поклонов, А. П. Смирнов, В. С. Макаренко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 34-39. – Бібліогр.: 22 назв. – ISSN 2079-0740.

В работе предложена комплексная методика калибровки средств измерения электрических процессов (длительностью от 10 мкс до 100 мкс, амплитудное значение разрядного тока 10^4 - 10^5 А, зарядное напряжение десятки киловольт) при электрическом разряде в жидкости. Она позволяет выполнить калибровку и проверку средств измерения на режимах близких по своим параметрам к измеряемым в процессе проведения экспериментальных работ, снизить вероятность ошибки, уменьшить погрешность процесса калибровки, а также периодически осуществлять проверку коэффициента уже поверенных средств измерения непосредственно в процессе проведения экспериментальных исследований.

Ключевые слова: высоковольтный разряд в жидкости, разрядный ток, напряжение на разрядном промежутке, коаксиальный омический шунт, делитель напряжения, катушка Роговского.

УДК 621.317.3

Реализация локальной системы предупреждения о грозовой опасности / В. В. Князев, И. А. Постельник // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 39-43. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Представлены результаты разработки локальной системы предупреждения о грозовой опасности, которая осуществляется по схеме «снизу-вверх». Такая схема имеет существенные преимущества по сравнению с аналогичными системами, которые функционируют в странах G20. Преимущество достигается за счет установки большого числа простых и дешевых локальных элементов, которые объединяются в многоуровневую сеть посредством передачи данных через сотовые сети и Интернет. Только такая концепция построения обеспечивает возможность создания системы оперативного предупреждения.

Ключевые слова: грозовая опасность, локальная система предупреждения, индикатор грозовой опасности.

УДК 537.8 : 537-7

Высоковольтная система питания магнитной системы электрофизической установки для получения и исследования многокомпонентной газометаллической плазмы / Ю. В. Ковтун, Е. В. Сюсько // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 44-48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

В работе рассмотрена высоковольтная система питания магнитной системы электрофизической установки для получения и исследования многокомпонентной газометаллической плазмы. Описаны конструкционные особенности импульсной высоковольтной системы питания магнитной систем электрофизической установки. Получены расчетные и экспериментальные зависимости разрядного тока через магнитную систему от времени. Рассмотрена возможность изменения формы импульса тока через магнитную систему и приближении ее к прямоугольной.

Ключевые слова: магнитная система, ток, напряжение, разряд, электрическая схема, индуктивность, сопротивление, емкость.

УДК 621.318

Взаимодействие собственных колебаний двумерного (2D) электронного газа с потоком заряженных частиц в условиях действия электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, А.А. Серков, В.С. Бреславец, И.Л. Яценко, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 49-52. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

В работе получено кинетическое уравнение для поверхностных плазмонов 2D системы, описывающее их взаимодействие с электронным потоком, движущимся по нормали к границе раздела сред. Предполагается, что газ локализован вблизи дельтавидной потенциальной ямы. Найден инкремент неустойчивости. Величина инкремента обратно пропорциональна

времени пролета частиц сквозь 2D электронную систему. Получены аналитические решения задач взаимодействия токов, приведенных внешним электромагнитным излучением, с собственными электромагнитными колебаниями структур комплектирующих полупроводниковые приборы, в условиях режима неустойчивости (генерации) колебаний. Определены расчетные соотношения для количественных характеристик обратных отказов (степени отклонения ВАХ от нормы) полупроводниковых приборов в зависимости от параметров внешнего электромагнитного излучения и физических качеств материалов, комплектирующих приборы.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетки, безстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

УДК 621.318

Влияние потенциального барьера на процессы взаимодействия плазмонов и заряженных частиц на границе раздела сред / В.И. Кравченко, А.А. Серков, В.С. Бреславец, И.Л. Яценко, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 14 (1186). – С. 53-56. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Определены вероятности процессов излучения и поглощения энергии электромагнитных колебаний электронами пучка на границе проводящего твердого тела с учетом потенциального барьера конечной величины, рассмотрена возможность развития неустойчивости колебаний. Учтено влияние конечной величины потенциального барьера на механизм обмена энергией волн и частиц на границе. Получены кинетические уравнения, определяющие изменение числа поверхностных плазмонов, выражения для инкрементов их неустойчивостей с учетом величины потенциального барьера на границе, которую пересекает поток заряженных частиц. Данные результаты позволяют учитывать вклад отраженной и прошедшей компонент потока частиц в суммарную энергию излучения поверхностных колебаний

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетки, безстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

УДК 621.318

Возбуждение поверхностных плазмонов при наличии потенциального барьера в условиях воздействия электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, А.А. Серков, В.С. Бреславец, И.Л. Яценко, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 14 (1186). – С. 56-60. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрено взаимодействие поверхностных плазмонов с потоком заряженных частиц при наличии потенциального барьера, исходя из энергетического принципа получены кинетические уравнения, определяющие изменение числа поверхностных плазмонов, выражения для инкрементов их неустойчивостей с учетом величины потенциального барьера на границе, который приводит к появлению отраженных от границы частиц пучка. Полученные результаты позволяют учитывать вклад отраженной и прошедшей компонент потока частиц в суммарную энергию излучения поверхностных колебаний. Исследованы механизмы взаимодействия потока заряженных частиц с собственными электромагнитными колебаниями двумерного электронного газа, возникновение которого обусловлено наличием потенциального барьера на границе раздела сред.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетки, безстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

УДК 621.318

Кинетическая неустойчивость поверхностных плазмонов при наличии потенциального барьера на границе раздела сред / В.И. Кравченко, А.А. Серков, В.С. Бреславец, И.Л. Яценко, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 14 (1186). – С. 60-64. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрено взаимодействие поверхностных плазмонов с потоком заряженных частиц при наличии потенциального барьера, исходя из энергетического принципа получены кинетические уравнения, определяющие изменение числа поверхностных плазмонов, выражения для инкрементов их неустойчивостей с учетом величины потенциального барьера на границе, который приводит к появлению отраженных от границы частиц пучка. Полученные результаты позволяют учитывать вклад отраженной и прошедшей компонент потока частиц в суммарную энергию излучения поверхностных колебаний. Исследованы механизмы взаимодействия потока заряженных частиц с собственными электромагнитными колебаниями двумерного электронного газа, возникновение которого обусловлено наличием потенциального барьера на границе раздела сред.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетки, безстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

УДК 621.317.3

Установка для испытаний технических средств на устойчивость к магнитным полям частоты сети У-МПЧС / Ю. С. Немченко, В. В. Князев, И. П. Лесной, С. Б. Сомхив // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 14 (1186). – С. 65-69. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Описана конструкция и результаты аттестации установки, предназначенной для испытаний настольных малогабаритных и напольных крупногабаритных электротехнических и электронных изделий, оборудования и аппаратуры, которые в процессе эксплуатации могут подвергаться воздействию магнитных полей частоты сети (длительному или кратковременному). Испытания проводятся по пяти испытательным уровням в длительном режиме и по двум испытательным уровням в

кратковременном режиме в соответствии с ДСТУ ІЕС 61000-4-8:2012.

Ключевые слова: испытание, магнитные поля частоты сети, технические средства, установка, аттестация.

УДК 621.74.046 : 004

Эффективность применения 3D-принтера ProJet460 Plus в серийном производстве изделий методом точного литья / В. А. Олейник, О. Н. Сизоненко, Г. Ф. Мьяльница // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 70-73. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрена возможность повышения технологичности процесса точного литья в серийном производстве предприятия за счет полномасштабного внедрения технологии быстрого прототипирования, на базе 3D-принтера ProJet460 Plus. Переход на изготовление керамических стержней охлаждаемых лопаток ГТД методом 3D-печати позволяет снизить количество технологических операций и сократить время, необходимое для устранения недочетов в случае их выявления при испытаниях.

Ключевые слова: 3D-принтер, 3D-печать, аддитивные технологии, трехмерная печать, стержни охлаждаемых лопаток.

УДК 551.594

Моделирование поражения стержня разрядом длинной искры с использованием многошаговой модели / А. А. Петков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 73-79. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Разработана многошаговая модель для определения вероятности поражения стержневого электрода, расположенного на плоскости, в полеобразующей системе электродов «стержень – плоскость». Показано, что предложенная модель позволяет адекватно описывать вероятность поражения стержневого объекта в разрядном промежутке длиной $H = 3 - 15$ м при соосном расположении электродов-стержней в полеобразующей системе. Близкие значения вариативного параметра K_{st} при моделировании наблюдаемых в экспериментах значениях вероятности поражения $p^* = 1$ позволяют считать одинаковыми процессы, приводящие к поражению стержня вне зависимости от размеров электродной системы и параметров импульсов напряжения, применяемых при испытаниях. Материалы работы могут быть использованы для дальнейших исследований поражения длинной искрой объектов, расположенных на плоской поверхности.

Ключевые слова: математическая модель, вероятность поражения, доверительный интервал, разряд длинной искры.

УДК 534.231/534-16 : 621.373

Особенности расчета переменного магнитного поля, создаваемого вибрирующим ферромагнитным диском / О.Н. Петрищев, В.В. Пилинский, А.С. Чупахин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 78-81. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Показано, что источниками низкочастотных электромагнитных помех могут быть металлические элементы радиоэлектронной аппаратуры, которые совершают механические колебания (вибрируют) в присутствии постоянного магнитного поля. В данной работе на примере колеблющегося ферромагнитного диска, рассмотрены последовательности вычислительных процедур, которые позволяют определить амплитуду переменной намагниченности вибрирующего диска и уровни переменного магнитного поля в окружающем пространстве.

Ключевые слова: электромагнитная обстановка; источник помех; звуковой диапазон; механические вибрации; магнитное поле; ферромагнитный диск.

УДК 539.3

Метод маршрутизации в беспроводной самоорганизующейся сети на основе аппарата нечеткой логики / И. А. Потапчук, А. В. Багрянцева // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 82-88. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Разработаны и исследованы модель и метод применения нечіткої логіки для решения задач маршрутизации в БСС-сетях. Предложен модифицированный метод маршрутизации для БСС-сети, базирующийся на аппарате нечеткой логики. Разработана общая структура контроллера нечеткой логики, определены входные и выходные параметры. Проведен сравнительный анализ предложенного метода с классическим AODV.

Ключевые слова: беспроводные сети, маршрутизация, нечеткая логика, нечеткий контроллер, нечеткие данные о состоянии радиолинии, QoS, FAODV.

УДК 621.372

Особенности обеспечения ЭМС гибридных систем в ЛЭП / А.Ф. Розадовский, В.С. Лазебный, В.В.Пилинский // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 89-93. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрены существующие схемы организации комбинированной (проводно-беспроводной) передачи данных по проводам ЛЭП, и возникающие в них интерференционные помехи. С целью снижения уровня помех предложено дополнить имеющиеся проводно-беспроводные PLC системы дополнительными заграждающими фильтрами на основе параллельного колебательного контура. Выполнено моделирование амплитудно-частотных характеристик данных фильтров с учетом схем замещения с регулярными и паразитными параметрами и предложены рекомендации по их применению.

Ключевые слова: PLC, беспроводная передача, интерференция, помехоподавляющие фильтры, моделирование, ЭМС.

УДК 681.5

Интеллектуальный метод оценки состояния здоровья человека / Н. В. Савченко, Д. А. Панасенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 14 (1186). – С. 93-96. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

На основе построение формализованных моделей для заболеваний печени (хронический гепатит и цирроз), описана зависимость результирующего диагноза от результатов обследования пациента, которая реализована в программе. Представлены этапы получения моделей, а также приведены экспериментальные весовые коэффициенты, используемые при построении

нии модели. Всего моделей с указанными характеристиками 33.

Ключевые слова: хронический гепатит, цирроз, диагноз, математическое моделирование, модель множественной регрессии, программный продукт.

УДК 621.762.3: 537.528

Влияние состава рабочей среды на скорость фронта волны давления высоковольтного электрического разряда / А.С. Торпаков, О.Н. Сизоненко, Э.И. Тафтай // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 14 (1186). – С. 97-101. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведены результаты экспериментальных исследований скорости фронта волны давления с помощью волноводного пьезоэлектрического датчика при высоковольтном электрическом разряде в воде и в воде с добавлением порошка Ti, керосине и керосине с добавлением порошка Ti. Экспериментально установлены условия формирования ударной волны и связь скорости фронта волны давления с дисперсионной средой, количеством дисперсной фазы и параметрами разрядного контура при ВЭР в дисперсной системе «порошок – жидкость».

Ключевые слова: электрический разряд, порошок титана, скорость фронта, ударная волна, дисперсная система.

УДК 537.528

Некоторые инварианты электрического взрыва проводников в оптимальных режимах / С. А. Хайнацкий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 14 (1186). – С. 102-106. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Получены некоторые инварианты электрического взрыва проводников в оптимальных режимах, когда вся запасенная энергия выделяется в первом полупериоде. Показано, что в оптимальных режимах ряд соотношений – отношение запасенной энергии к массе проводника, к энергии сублимации, отношение волнового сопротивления разрядного контура к начальному омическому сопротивлению проводника, не зависят от параметров контура и размеров проводников. Определено среднее значение отношения начального напряжения к длине проводника, зависящее только от собственной частоты разрядного контура. Установлены границы применимости модели однородного взрыва проводников.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, оптимальный режим, инварианты подобия, электроразрядный контур.

УДК 621.314:621.373

Стационарный режим колебаний магнитного генератора импульсов при работе на рассогласованную нагрузку / А.И. Христо, Н.И. Кускова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 14 (1186). – С. 106-111. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

В работе рассмотрен стационарный режим колебаний одноключевого магнитно-полупроводникового генератора импульсов при работе на рассогласованную нагрузку. Проведено численное моделирование периодических электромагнитных процессов в цепях генератора. Получены аналитические выражения, позволяющие качественно и количественно описать переходный процесс на каждом интервале в отдельности. Определены условия существования режима стационарных колебаний на рассогласованной нагрузке, когда период коммутации ключа становится соизмерим с периодом затухающих колебаний электромагнитного процесса обратного перемангничивания.

Ключевые слова: магнитный генератор импульсов, коммутирующий дроссель, численное моделирование.

УДК 537.52:542.9:661.66

Условия разрядноимпульсного инициирования и параметры процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза углеродных наноматериалов / Д. И. Челпанов, В. Ю. Бакларь, Н. И. Кускова, А. Н. Корзинова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 14 (1186). – С. 112-116. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Получены аналитические зависимости параметров разрядного контура от термодинамических характеристик порошковых систем исходных реагентов. Рассчитаны электротехнические параметры для инициирования процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза углеродных наноматериалов в системах порошков составами алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + политетрафторэтилен + железо. Проведены экспериментальные исследования процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в выбранных порошковых системах. Построены температурные профили для волн горения в выбранных порошковых системах, которые представлены в виде зависимостей теплового потока от температуры и температуры от времени.

Ключевые слова: электроразрядный контур, разрядноимпульсное инициирование, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, углеродные наноматериалы, углеродные нанотрубки.

ABSTRACTS

The dynamic characteristics of magnetoelastics converters / N.L. Antonov, V.F. Bezotosny, V.V. Kozlov, O.V. Nabokova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 5-9. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-0740.

In this study it is shown that the duration of transients in the magneto-elastic converters can be reduced to the values that do not exceed the distribution duration of mechanical tensions in the object of research, and it may be achieved by selecting the number of turns and the frequency of the magnetizing current. It allows to use the magnetoelastic converters for monitoring of high-frequency dynamic processes, and the choice of rational parameters of MC allows to reduce a measurement errors. It is necessary to raise the frequency of the magnetizing current for safety of the sensitivity of MC, and one must take into account the surface effect at calculations, that is possible by using a fictitious magnetic permeability. It was set by additional researches that it is necessary to know a permissible limit of material strength of magnetic circuit, accounting of anisotropy of material, initial permeability and magnetostriction at designing of MC. As an example of the practical use of above researches there is the developed system which solves the problem of rapid non-destructive control of ferromagnetic materials and structures to determine the mechanical stresses the occurrence of which is due to the influence of operational and technological factors.

Keywords: magnetoelastic converter, transient, mechanical tensions, a time constant, dynamic characteristic.

Calculation estimation of electro-thermal resistibility of cable-explorer production of objects of electroenergy to action induced the powerful electromagnetic hindrance of nanosecond impulse of current / M.I. Baranov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 10-14. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.

The results of calculation estimation of electro-thermal resistibility of send-offs and cables are resulted with copper (aluminum) tendons, by the polyvinylchloride (PVKH) and polyethylene (PET) isolations of primary (second) electric chains of objects of electroenergy to action on them of aperiodic impulse of current of temporal form of 5/50 ns with amplitude of (1-100) μ A, flowing of which is caused external powerful electromagnetic hindrance of artificial origin with peak-temporal parameters (PTP). Maximal numeral values maximum of possible and critical closeness of indicated hindrance of nanosecond impulse of current are certain with accepted PTP in the examined send-offs (cables) without a hard isolation, with PVKH and PET by the isolations of electric chains of power objects.

Key words: external powerful electromagnetic hindrance; wires and cables of electric chains of objects of electroenergy; electro-thermal resistibility of cable-explorer productions of primary and second electric chains of power objects; maximum possible and critical closeness of impulse of current of aperiodic temporal form of 5/50 ns in send-offs and cables of electro-chains of power objects.

Investigation of high-voltage electro-physical characteristics of the handling of gaseous hydrocarbons to produce carbon nanomaterials / L.Z. Boguslavskiy, D.V. Vinnichenko, N.S. Nazarova, Y.O. Adamchuck, S.V. Chushchak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 15-19. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.

The study of the electrophysical characteristics of the discharge treatment of gaseous hydrocarbons was performed. The electro-physical features of the plasma channel formation in the carbonaceous gas (propane – butane mix) were set. The shapes of the current-voltage characteristics, typical for the productive synthesis of the carbon nanomaterials were identified and their dependencies on the power in the discharge channel and the length of the electrode gap were obtained. The voltage levels, which guarantee the breakdown, and the voltage on the discharge channel, typical for the productive synthesis mode, were obtained experimentally. It was shown that if the change the electrode gap's length occurs, the shape of the current and voltage pulses greatly varies. It complicates the analysis of the relations between the process parameters and the electrical characteristics. The functionals, which characterize the shape of the discharge pulses, were identified. Based on these functionals dependencies analysis, it was determined that the output power of the discharge channel is the most informative feature for the monitoring of the length of the electrode gap.

Keywords: electrical characteristics, high-voltage processing, gaseous hydrocarbons, Synthesis of Carbon Nanomaterials.

Electrostatic precipitators for exhausts gases of thermal power plants as a load for a combined power source / L. Z. Boguslavskij, V. V. Diordijchuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 20-23. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.

The article deal with power supply systems for electrostatic precipitators (ESP). The dust removal process lead to dust layer forming on the precipitation electrode of the ESP. The power supply design problems connected with load character changing from active-capacitance type to fully capacitance type due to contamination of the precipitation electrode. The voltage distribution between the dust layer and the gas gap determine the corona discharge mode according to volt-ampere characteristic. The interconnection between voltage on gas gap and thickness of dust layer, which predict the intensity of corona discharge in current conditions, is established. It is easy to model corona's discharge locking effect by using the resulting formula. The electric capacity of electrode system change character in dependency of dust layer thickness is established. The changing of capacity of the electrode system influence on a power of a supply system, which used pulsed ESP energization. The formula for determining the time constant of the electrode system is obtained.

Keywords: electrostatic precipitation, dust layer thickness, combined power source, corona discharge closing effect.

Verification of the state of equipotential bounding systems on power industry object / O. Y. Glybov, S. V. Kiprych, G. M. Koliushko, A. V. Plichko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 23-29. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.

The basic regulatory requirements imposed on the main and additional equipotential bounding systems (EBS) is shown in the article. It is shown: what exactly can be used as protective conductors of these systems, what should be their cross section, how to lay

and carry out the connection of protective conductors. It is given a list of the documents transmitted by the installer organization to maintenance of electrical installations, also a content of the grounding system passport. The activities directed to test of EBS, which include: visual inspection; checking structural condition; measurement of the contact connections resistance between the grounding element and an element of EBS are described. Examples of EBS inspections are given. The basic disadvantages of the implementation of EBS is formulated. The main conclusion: testing of the equipotential bounding systems it is advisable to combine with testing of the grounding system and lightning protection systems.

Keywords: electrical safety, grounding, equipotential bounding, electrical installations, testing.

Study of voltage operation of the high-voltage gas-filled noncontrollable dischargers of the electrodischarge immersion installation / V. G. Zhekul, Ju. I. Melkher, S. G. Poklonov, O. P. Smirnov, I. S. Shvets // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – C. 30-33. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

The experimental investigation of the influence of parameters of technological modes of operation of the electrodischarge immersion installation intended to increase production rate of oil wells (the change of the repetition frequency of discharges of 0.2 to 2 Hz, ambient temperature from 10 °C to 90 °C, the number of discharges) by the value of the operation voltage of its high voltage gas-filled spark gap uncontrollable discharger is accomplished in the study. It is established that the increase of temperature leads to the increase of the operation voltage, and increasing the repetition rate and quantity of discharges lead to the decreasing response voltage of the discharger. In this case the obtained dependency can reveal regions of saturation. It is shown that the influence of these parameters may be significant and requires the introduction of cyclic modes of operation of the electrodischarge immersion installation for improved efficiency in the processing of wells.

Keywords: electrodischarge immersion installation, high-voltage discharger, ambient temperature, repetition frequency of discharges.

A comprehensive method of calibration of measurement tools for electrical processes in a high-voltage discharge in fluid / V. G. Zhekul, S. G. Poklonov, O. P. Smirnov, V.S. Makarenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – C. 34-39. – Bibliogr.: 22. – ISSN 2079-0740.

The paper proposes a comprehensive method of calibration of measurement tools for electrical processes (duration of 10 μs to 100 μs, peak value of discharge current 10^4 - 10^5 A, charging voltage of tens of kilovolts) during an electrical discharge in a fluid. It allows you to perform calibration and verification of measurement tools at ranges close by its parameters to the parameters measured in the process of experimental work, to reduce the probability of error, decrease the error of the calibration process and periodically perform a ratio check of already calibrated measurement tools directly in the process of experimental studies. As an example, we demonstrate calibration of a coaxial resistive shunt, the Rogowski coil, which was used to measure the discharge current and the capacitive voltage divider and which was used to measure the voltage on the discharge gap.

Keywords: high-voltage discharge in a fluid, discharge current, voltage on the discharge gap, coaxial resistive shunt, voltage divider, Rogowski coil.

The implementation of local warning system for thunderstorm danger / V.V. Kniaziev, I.O. Postilnyk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – C. 39-43. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.

The results of development of the local warning system for thunderstorm danger, which is carried out on a "bottom-up", presents. This arrangement has significant advantages in comparison with similar systems, which operate in the G20 countries. The advantage achieved by the installation of a large number of simple and cheap local elements, which are combined into a multi-level network via a data transmission via cellular networks and the internet. Only such a construction of the concept makes it possible to create a rapid alert system. Indeed, the number of users who have their own money to establish the elements of a local thunderstorm hazard warning system can fairly quickly (within a few years) to exceed 1% of the number of residents in areas where lightning protection problem is urgent. Device standalone indicator of storm danger IKC-1, which operates in the corona discharge effect from lightning rods, is described.

Keywords: storm danger, local warning system, thunderstorm hazard indicator.

High voltage system for supply magnetic system of electrophysical installation for getting and research gas metal multicomponent plasma / Yu. V. Kovtun, E. V. Siusko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – C. 44-48. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

The paper considers high voltage system for supply magnetic system of electrophysical installation for getting and research gas metal multicomponent plasma. It shows the design features of pulse high-voltage system for supply the magnetic systems of electrophysical installation. We got the calculated and experimental dependence of discharge current from time through the magnetic system. Considered the possibility of changing the shape of the current pulse through the magnetic system and its approximation to the square. The article shows that with the addition specific inductance to the circuit of the magnetic system dependence of the discharge current from time is more similar to rectangular.

Keywords: magnetic system, current, voltage, discharge circuit, inductance, resistance.

The kinetic stability of surface plasmons in the presence of the potential barrier at the interface section / V.I.Kravchenko, A.A.Serkov, V.S.Breslavets, I.L. Yatsenko, I.V.Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – C. 49-52. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

The paper obtained kinetic equation for surface plasmons 2D system, describing their interaction with the electron flow, which moves along the normal to the limit distribution environments. It is assumed that the gas is localized near the potential well of the deltoid. Found instability increment. The value of the growth rate is inversely proportional to the time of flight of the particles through the 2D electron system. The analytical solution of problems of interaction of currents given external electromagnetic radiation, electromagnetic waves with their own structures of components, semiconductor devices in a mode of instability (generation) oscillations. Determined ratio calculated for the quantitative characteristics of inverse failures (CVC degree of deviation from the norm) semicon-

ductor devices, depending on the parameters of the external electromagnetic radiation and physical properties of materials, components, instruments.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor superlattices, collisionless extinction, kinetic and hydrodynamic instability, generation, cherenkov and transition radiation, helicon, charged particles, surface waves.

Effects on interaction potential barriers surface plasmons and charged particle at the distribution media / V.I.Kravchenko, A.A.Serkov, V.S.Breslavets, I.L. Yatsenko, I.V. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – C. 53-56. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

The paper examined the impact of a potential barrier to the mechanisms of interaction of electromagnetic waves and streams of charged particles. This paper deals with two aspects of this action: - first, the presence of a potential barrier leads to changes in the parameters of flux; secondly, the potential barrier leads to the two-dimensional electron layer with its own range of surface fluctuations.

It is shown the effect that the potential barrier leads to increased increment compared to the increments of instability in the absence of a potential barrier. This increase is due to the fact that the contribution to the total radiation particles flow in addition to the transition, and adds braking radiation, which is associated with a change in velocity of the particles to the limit.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor superlattices, collisionless extinction, kinetic and hydrodynamic instability, generation, cherenkov and transition radiation, helicon, charged particles, surface waves.

At excitation surface plasmons in reality the potential barrier in terms of electromagnetic radiation / V.I.Kravchenko, A.A.Serkov, V.S.Breslavets, I.L. Yatsenko, I.V.Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – C. 56-60. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

The paper considered the interaction of surface plasmons with a stream of charged particles that move along the normal to the boundary of two plasma similar distribution environments using energy approach. Analytical problem solving interaction of currents given external electromagnetic radiation, electromagnetic oscillations with its own structures, components semiconductor devices, under the regime of instability (generation) fluctuations.

It was shown that when the kinetic energy of the electrons flow greater than plasmon energy, the electron plasmon radiation processes dominate over the processes of absorption in quantum particles flow approximation.

It obtained an expression for the instability increment surface plasmons, which depends on the reflectivity and particles passing through the barrier.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor superlattices, collisionless extinction, kinetic and hydrodynamic instability, generation, cherenkov and transition radiation, helicon, charged particles, surface waves.

The kinetic stability of surface plasmons in the presence of the potential barrier at the interface section / V.I.Kravchenko, A.A.Serkov, V.S.Breslavets, I.L. Yatsenko, I.V.Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – C. 60-64. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

The paper, based on the Schrödinger equation with the potential and boundary conditions for the wave function of an electron is shown that in such a system having the surface electronic states - 2D electron gas.

Obtained dispersion equation which relates the tangential component of the momentum of the electron wave function localization, depth and width of the potential well. Found spectrum of surface electron states. Defined increment volatility surface plasmons. The value increment inversely proportional to the time of flight of the particles through a 2D electron system.

Analytical problem solving interaction of currents given external electromagnetic radiation, electromagnetic oscillations with its own structures, components semiconductor devices, under the regime of instability (generation) fluctuations.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor superlattices, collisionless extinction, kinetic and hydrodynamic instability, generation, cherenkov and transition radiation, helicon, charged particles, surface waves.

The testing of technical means for resistance to network frequency magnetic fields U-MPChS / Y.S.Nemchenko, V.V.Kniyaziev, I.P.Lesnoy, S.B.Somhiev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – C. 65-69. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

The design and results of the test of the installation, intended for tests small table-top and floor-standing electrical equipments, engineering and electronic wares, apparatus, which in the process of exploitation can be exposed to influence of the magnetic fields of frequency of network (protracted or brief) is described. Tested after five proof-of-concept levels in the protracted mode and on two proof-of-concept levels in the brief mode in accordance with ДСТУ IEC 61000-4-8:2012. The materials of the article explains how to install design. Presented by the functionality and operation of all elements of the installation. Metrological maintenance of tests based on the use of the developed sensor of magnetic field strength. This allows for reliable control of the level of magnetic field strength during the test. The installation U-MPChS well went primary attestation with participation the representatives of GP «Kharkovstandartmetrologija» on worked out in NIPKI «Molnija» NTU «HPI» to the corresponding program and methodology of attestation. This installation brought into operation and participated in the tests of various equipments on susceptibility to magnetic fields of frequency of network.

Keywords: test, magnetic fields of frequency of network, technical equipments, installation, attestation.

Efficiency of ProJet460 Plus 3D-printer use in serial production of products by method of precision casting / V. A. Oliinyk, O.M. Syzonenko, H. P. Myalnytsya // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – C. 70-73. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

Possibility for increase of manufacturability of precision casting process in serial production of enterprise by full-scale introduction of fast prototyping technology based on ProJet460 Plus 3D-printer is considered. Transition to manufacture of ceramic rods of cooled blades of turboshaft drives by method of 3D-printing allows decreasing the number of technological operations and decreasing time needed for elimination of drawbacks when they are identified during tests.

Key words: 3D-printer, 3D-printing, additive technologies, three-dimensional printing, rods of cooling blades.

Modeling defeat rod long spark discharge using a multi-step model / A. A. Petkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 73-77. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

Purpose. Building a multi-step model, which allows to calculate the probability of hitting the rod object of a long spark. The object is located in an electric field, which is formed in the electrode system "rod-plane". Confirmation of adequacy of the model to experimental data, which describe the probability of hitting in the rod objects. Methodology. Numerical simulation of movement long sparks from a point in space in the direction of the plane. Comparison of the results of modeling of the probability of defeat of a rod with a confidence interval, which is determined on the basis of experimental data. Results. Developed multistage model adequately describes the probability of defeat the rods objects. In the simulation, the discharge gap has a length of $H = 3 - 15$ m. The adequacy confirmed by the case where the long spark begins to develop from a point on the axis of the rod object. Originality. For the first time propositioned a mathematical model to determine the probability of defeat the rod object, which is based on multi-step procedure traffic long spark. Practical value. The developed model allows to predict the probability of defeat the rod of objects a length to 6 m.

Keywords: mathematical model, probability of defeat, confidence interval, long spark discharge.

Features of an alternating magnetic field generated by vibrating ferromagnetic disc calculation / O.N. Petrishchev, V.V. Pilinsky, A.S. Chupakhin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 78-81. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

It is shown that the sources of low-frequency electromagnetic interference may be metal parts of electronic equipment that perform mechanical vibrations surrounded by a magnetic field. For example, a vibrating ferromagnetic disc committing ax symmetric vibrations lateral bending, consider the sequence of computational procedures that determine the amplitude of the variable magnetization of this disc and create levels of the alternating magnetic field in the surrounding space. The calculation results are the basis for the subsequent developing the method for determining the low-frequency noise in the printed conductor, because of the vibration of ferromagnetic components of electronic equipment. Then, based on the known components of the vector of the magnetic stray field strength can be calculated magnetic flux and electromotive force in the closed circuits formed by printed conductors on the electronics boards.

Keywords: electromagnetic environment; source interference; magnetic field; sound range; mechanical vibration; magnetic field; ferromagnetic disc.

Routing method in wireless self-organized network based on fuzzy logic / I. A. Potapchuk, A. V. Bagryantseva // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 82-88. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

Researched and developed the model and method of applying fuzzy logic for solving routing problems in cognitive wireless data transition systems. Made a comparative analysis of the proposed method with the classical AODV. As a result, an applying of a fuzzy controller makes it possible to use band with more effectively and maintain a high level of the quality of service (QoS). Also, using fuzzy calculations on the network layer allows to increase stability of work of the system in general. Fuzzy logic appliance still remains the one of perspective ways of creation of the cognitive wireless networks.

Keywords: wireless networks, routing, fuzzy logic, fuzzy controller, fuzzy data of the state of the radiolink, QoS, FAODV.

Features EMC Hybrid PLC Systems in High-voltage Power Lines. / A.F. Rozvadovskiy, V.S. Lazebny, V.V. Pilinsky // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 89-93. – Bibliogr.: 21. – ISSN 2079-0740.

The combined PLC-Systems with wireless data transmission by high-voltage power lines (HVPL) are discussed in this paper. The facility of the formation of a complex electromagnetic environment was shown. The interference of signals radiated by power lines and transceiver's antennas was analyzed. There were calculated the antenna pattern of the emission radiated by power lines (HVPL). It was shown that there is the superposition of the signals radiated by transceiver's antennas and the signal radiated by power lines. There was proposed to apply the RFI filters to provide EMC in the combined PLC systems with the wire-wireless data transmission. These filters are based on parallel resonant circuits. The examples of modeling RFI filters are shown. The considered methodology takes into account their parasitic parameters filters components. The software Multisim 12 was used for modeling of amplitude-frequency characteristics RFI filters. Based on obtained results the recommendations for design of these filters have given.

Keywords: PLC, wireless data transmission, interference, RFI-filters, simulating, EMC.

Intelligent method for assessing human health / N. V. Savchenko, D. A. Panasenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 93-96. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

On the basis of the construction of formal models for liver disease (chronic hepatitis and cirrhosis), describes the dependence of the result of the diagnosis by the results of the patient survey, which is implemented in the program. Possible methods for the diagnosis of these diseases. The stages of obtaining models. Construction of models was performed using regression analysis. Shown are some of the key formulas needed to build models. It also includes the incremental change in the number of models at each stage. Besides shows experimental weights used in constructing the model. Total models with these characteristics 33. Results fourteen key factors that are used directly for the number of models on which to base and put a presumptive diagnosis.

Key words: chronic hepatitis, cirrhosis, diagnosis, mathematical modeling, multiple regression model, the software product.

The influence of working medium composition on the velocity of pressure wave front of high voltage electric discharge / A.S. Torpakov, O.N. Sizonenko, E.I. Taftai // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 97-101. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-0740.

Results of experimental study of pressure wave front velocity with piezoelectric waveguide sensor during high voltage electric discharge (HVED) in water, water with addition of Ti powder, kerosene and kerosene with addition of Ti powder are given. Influence of continuous medium type, disperse phase presence and discharge circuit parameters on pressure wave front velocity is experimentally found. The conditions for formation of shock waves during HVED in kerosene with addition of Ti powder with 1/9 and 1/18 solid/liquid ratio and charging voltage $U=50$ kV are the capacitance of capacitor battery no less than 0.8 μF and inductance of dis-

charge circuit less than 0.9 μH .

Key words: electric discharge, titanium powder, front velocity, shock wave, disperse system.

Some invariants of the electrical explosion of conductors in optimal modes / S. A. Khainatskiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 102-106. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

The objective of the research was to find the variables which characterize features of the electrical explosion of conductors in optimal modes (with all stored energy released in the first half-cycle) and which aren't dependent on the electrical parameters of the energy source and geometrical sizes of the conductor, i.e. are invariant to their change. Optimality conditions obtained earlier using experimentally determined criteria of similarity (invariants of similarity) of electrical characteristics of the explosion of conductors were used. It was shown that in optimal modes a number of dependencies – the dependence of the stored energy on the mass of the conductor and on the sublimation energy, the dependence of the wave resistance of the discharge circuit on the initial ohmic resistance of the conductor – depend only on the variables characterizing thermal and electrotechnical properties of the conductors' metal. Based on acquired dependencies, the average value of the ratio of the initial voltage on the length of the conductor which depends only on the natural frequency of the discharge circuit was determined. Limitations of the applicability of the model of homogeneous explosion of conductors were defined.

Keywords: electrical explosion of conductors, optimal mode, invariants of similarity, electrical discharge circuit.

Stationary mode of oscillations of the magnetic pulse generator when working a mismatched load / A.I. Khristo, N.I. Kuskova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 106-111. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.

The stationary oscillation mode single-key magnetic semiconductor pulse generator when operating in the mismatched load is reviewed. The numerical modeling of periodic electromagnetic processes in the circuits of the generator is produced. Analytic expressions defining the conditions of existence of a stationary mode of oscillation magnetic semiconductor pulse generator with serial transducer element when working in the mismatched load are derived. It is shown that the duration and amplitude of the parabolic pulse is directly proportional to capacitance of capacitor of compression unit, the residual voltage on it, the number of turns of the primary winding of the switching choke and is inversely proportional to the current of magnetization, and the number of turns of the magnetizing winding of switching choke.

Keywords: magnetic pulse generator, switching choke, numerical simulation.

Conditions for the pulse discharge initiation and parameters of the process of self-propagating high-temperature synthesis of carbon nanomaterials / D. I. Chelpanov, V. Ju. Baklar, N. I. Kuskova, A. N. Korsinova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 14 (1186). – С. 112-116. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

Analytical dependencies of electrical discharge circuit's parameters on thermodynamic characteristics of powder systems of initial reagents were obtained. Electrotechnical parameters for the initiation of the process of self-propagating high-temperature synthesis of carbon nanomaterials in general in powder system of aluminum + polytetrafluorethylene and carbon nanotubes specifically in powder system aluminum + polytetrafluorethylene + iron with iron used as a known nanotubes catalyst were calculated. Experimental researches of the process of self-propagating high-temperature synthesis of carbon nanomaterials in chosen powder systems were conducted. Thermal profiles consisting of dependencies of thermal flow on temperature and temperature on time for combustion waves in chosen powder systems were formed based on the experimental data about combustion wave's parameters and calculated parameters of initial powders systems.

Keywords: electrical discharge circuit, pulse discharge initiation, self-propagating high-temperature synthesis, carbon nanomaterials, carbon nanotubes.

ЗМІСТ

Антонов М. Л., Безотосний В. Ф., Козлов В. В., Набокова В. В. Динамічні характеристики магнітопружних перетворювачів	5
Баранов М. И. Расчетная оценка электротермической стойкости кабельно-проводниковой продукции объектов электроэнергетики к воздействию индуцированного мощной электромагнитной помехой наносекундного импульса тока	10
Богуславський Л. З., Вінниченко Д. В., Назарова Н. С., Адамчук Ю. О., Чуцак С. В. Дослідження електрофізичних характеристик високовольтної обробки газоподібних вуглеводнів для отримання вуглецевих наноматеріалів	15
Богуславский Л. З., Диордийчук В. В. Электростатические фильтры дымовых газов тепловых электростанций как нагрузка источников комбинированного электропитания	20
Глебов О. Ю., Киприч С. В., Колиушко Г. М., Пличко А. В. Проверка состояния системы уравнивания потенциалов энергообъектов	23
Жекул В. Г., Мельхер Ю. И., Поклонов С. Г., Смирнов А. П., Швец И. С. Исследования напряжения срабатывания высоковольтных газонаполненных неуправляемых разрядников электроразрядных погружных установок	30
Жекул В. Г., Поклонов С. Г., Смирнов А. П., Макаренко В. С. Комплексная методика калибровки средств измерения электрических процессов при высоковольтном разряде в жидкости	34
Князев В. В., Постельник И. А. Реализация локальной системы предупреждения о грозовой опасности	39
Ковтун Ю. В., Сюсько Є. В. Високовольтна система живлення магнітної системи електрофізичної установки для отримання та дослідження багатокomпонентної газометалевої плазми	44
Кравченко В. И., Серков А. А., Бреславец В. С., Яценко И. Л., Яковенко И. В. Взаимодействие собственных колебаний двумерного (2D) электронного газа с потоком заряженных частиц в условиях действия электромагнитного излучения	49
Кравченко В. И., Серков А. А., Бреславец В. С., Яценко И. Л., Яковенко И. В. Влияние потенциального барьера на процессы взаимодействия плазмонов и заряженных частиц на границе раздела сред	53
Кравченко В. И., Серков А. А., Бреславец В. С., Яценко И. Л., Яковенко И. В. Возбуждение поверхностных плазмонов при наличии потенциального барьера в условиях воздействия электромагнитного излучения	56
Кравченко В. И., Серков А. А., Бреславец В. С., Яценко И. Л., Яковенко И. В. Кинетическая неустойчивость поверхностных плазмонов при наличии потенциального барьера на границе раздела сред	60
Немченко Ю. С., Князев В. В., Лесной И. П., Сомхивев С. Б. Установка для испытаний технических средств на устойчивость к магнитным полям частоты сети У-МПЧС	65
Олейник В. А., Сизоненко О. Н., Мьяльница Г. Ф. Эффективность применения 3d-принтера ProJet460 Plus в серийном производстве изделий методом точного литья	70
Петков А. А. Моделирование поражения стержня разрядом длинной искры с использованием многошаговой модели	73
Петрищев О.Н., Пилинский В.В., Чупахин А.С. Особенности расчета переменного магнитного поля, создаваемого вибрирующим ферромагнитным диском	78
Потапчук И. А., Багрянцева А. В. Метод маршрутизации в беспроводной самоорганизующейся сети на основе аппарата нечеткой логики	82
Розвадовский А.Ф., Лазебный В.С., Пилинский В.В. Особенности обеспечения ЭМС гибридных систем в ЛЭП	89
Савченко Н. В., Панасенко Д. А. Интеллектуальный метод оцінки стану здоров'я людини	93
Торпаков А. С., Сизоненко О. Н., Тафтай Э. И. Влияние состава рабочей среды на скорость фронта волны давления высоковольтного электрического разряда	97
Хайнацкий С. А. Некоторые инварианты электрического взрыва проводников в оптимальных режимах	102
Христо А. И., Кускова Н. И. Стационарный режим колебаний магнитного генератора импульсов при работе на рассогласованную нагрузку	106
Челпанов Д. И., Бакларь В. Ю., Кускова Н. И., Корзинова А. Н. Условия разрядноимпульсного инициирования и параметры процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза углеродных наноматериалов	112
Реферати	117
Рефераты	122
Abstracts	127

CONTENTS

Antonov N.L., Bezotosny V.F., Kozlov V.V., Nabokova O.V. The dynamic characteristics of magnetoelastics converters	5
Baranov M.I. Calculation estimation of electro-thermal resistibility of cable-explorer production of objects of electroenergy to action induced the powerful electromagnetic hindrance of nanosecond impulse of current	10
Boguslavskiy L.Z., Vinnichenko D.V., Nazarova N.S., Adamchuck Y.O., Chushchak S.V. Investigation of high-voltage electro-physical characteristics of the handling of gaseous hydrocarbons to produce carbon nanomaterials	15
Boguslavskij L. Z., Diordijchuk V. V. Electrostatic precipitators for exhausts gases of thermal power plants as a load for a combined power source	20
Glyebov O. Y., Kiprych S. V., Koliushko G. M., Plichko A. V. Verification of the state of equipotential bounding systems on power industry object	23
Zhekul V. G., Melkher Ju. I., Poklonov S. G., Smirnov O. P., Shvets I. S. Study of voltage operation of the high-voltage gas-filled noncontrollable dischargers of the electrodischarge immersion installation	30
Zhekul V. G., Poklonov S. G., Smirnov O. P., Makarenko V.S. A comprehensive method of calibration of measurement tools for electrical processes in a high-voltage discharge in fluid	34
Kniaziev V.V., Postilnyk I.O. The implementation of local warning system for thunderstorm danger	39
Kovtun Yu. V., Siusko E. V. High voltage system for supply magnetic system of electrophysical installation for getting and research gas metal multicomponent plasma	44
Kravchenko V.I., Serkov A.A., Breslavets V.S., Yatsenko I.L., Yakovenko I.V. The kinetic stability of surface plasmons in the presence of the potential barrier at the interface section	49
Kravchenko V.I., Serkov A.A., Breslavets V.S., Yatsenko I.L., Yakovenko I.V. Effects on interaction potential barriersurface plasmons and charged particle at the distribution media	53
Kravchenko V.I., Serkov A.A., Breslavets V.S., Yatsenko I.L., Yakovenko I.V. At excitation surface plasmons in reality the potential barrier in terms of electromagnetic radiation	56
Kravchenko V.I., Serkov A.A., Breslavets V.S., Yatsenko I.L., Yakovenko I.V. The kinetic stability of surface plasmons in the presence of the potential barrier at the interface section	60
Nemchenko Y.S., Kniaziev V.V., Lesnoy I.P., Somhiev S.B. The testing of technical means for resistance to network frequency magnetic fields U-MPChS	65
Oliinyk V. A., Syzonenko O.M., Myalnytsya H. P. Efficiency of Projet460 Plus 3D-printer use in serial production of products by method of precision casting	70
Petkov A. A. Modeling defeat rod long spark discharge using a multi-step model	73
Petrishchev O.N., Pilinsky V.V., Chupakhin A.S. Features of an alternating magnetic field generated by vibrating ferromagnetic disc calculation	78
Potapchuk I. A., Bagryantseva A. V. Routing method in wireless self-organized network based on fuzzy logic	82
Rozvadovskiy A.F., Lazebny V.S., Pilinsky V.V. Features EMC Hybrid PLC Systems in High-voltage Power Lines	89
Savchenko N. V., Panasenko D. A. Intelligent method for assessing human health	93
Torpakov A.S., Sizonenko O.N., Taftai E.I. The influence of working medium composition on the velocity of pressure wave front of high voltage electric discharge	97
Khainatskiy S. A. Some invariants of the electrical explosion of conductors in optimal modes	102
Khristo A.I., Kuskova N.I. Stationary mode of oscillations of the magnetic pulse generator when working a mismatched load	106
Chelpanov D. I., Baklar V. Ju., Kuskova N. I., Korsinova A. N. Conditions for the pulse discharge initiation and parameters of the process of self-propagating high-temperature synthesis of carbon nanomaterials	112
Abstracts (in Ukrainian)	117
Abstracts (in Russian)	122
Abstracts	127

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Збірник наукових праць

Серія:
Техніка та електрофізика високих напруг

№ 14 (1186) 2016

Науковий редактор: д-р техн. наук, проф. В. І. Кравченко
Технічний редактор: канд. фіз.-мат наук, ст. наук. співр. Л. В. Ваврів
Відповідальний за випуск: канд. техн. наук Г. Б. Обухова

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

Обл.-вид № 13-16.

Підп. до друку 15.04.2016 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,75. Облік.-вид. арк. 10.
Тираж 300 пр. 1-й завод 1-100. Зам. № 23. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вил Фрунзе, 21

Друкарня ВАТ «Цифра Прінт».

Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 03.08.2009 р.

Адреса: 61166, м. Харків, вул. Данилевського, 30
