

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

ВІСНИК

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

Серія: Техніка та електрофізика високих напруг

№ 38 (1260) 2017

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2017

Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».
Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ».
– 2017. – № 38 (1260). – 100 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

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

Координаційна рада:

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

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

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

Є. Є. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.; А. В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;

Ф. Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

А. І. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.;

В. Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. ДОМНІН, д-р техн. наук, проф.;

В. В. СПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;

П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;

С. І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; В. М. КОШЕЛЬНИК, д-р техн. наук, проф.;

В. І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Г. В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.;

О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; В. І. НІКОЛАЄНКО, канд. іст. наук, проф.;

П. Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.; В. А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.;

М. І. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.;

Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.; Ю. І. ТІМОФЕЄВ, 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.; М. І. БОЙКО, д-р техн. наук, доц.;

А. Г. ГУРІН, д-р техн. наук, проф.; Б. В. КЛИМЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

В. В. КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, ст. наук. співр.; О. А. СЕРКОВ, д-р техн. наук, проф.;

Є. І. СОКОЛ, д-р техн. наук, проф.; І. В. ЯКОВЕНКО, д-р фіз.-мат. наук, проф.;

І. В. ЯКОВЕНКО, д-р фіз.-мат. наук, проф.; Х. РАДЕВ, проф., Технічний ун-т, Софія, Болгарія;

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

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

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

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

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 7 від 21 вересня 2017 р.

ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print) © Національний технічний університет «ХПІ», 2017

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

BULLETIN
OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
"KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE"

Series: Technique and Electrophysics of High Voltage

№ 38 (1260) 2017

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkiv
NTU "KhPI", 2017

Bulletin of the National technical university " Kharkiv polytechnic institute". Collected Works. Series: Techniques and Electrophysics of High Voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2017. – № 38 (1260). – 100 p.

State edition

Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy

KB № 5256 from July, 2, 2001

The collection is published on Ukrainian, Russian and English.

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

Coordinating Board:

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

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

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

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

F.F. Gladkii, Dr. Tech. Sci., Prof.; M.D. Godlevskii, Dr. Tech. Sci., Prof.;

A.I. Grabchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.G. Dan'ko, Dr. Tech. Sci., Prof.;

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

V.V. Epifanov, PhD. Tech. Sci., Prof.; Yu.I. Zaisev, PhD. Tech. Sci., Prof.;

P.A. Kachanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.B. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.;

S.I. Kondrashov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.M. Koshel'nik, Dr. Tech. Sci., Prof.;

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

O.K. Morachkovskii, 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:

Editor-in-chief: V. Kravchenko, Prof., Dr. Tech. Sci., Director of RDI "Molniya" of NTU "KhPI".

Executive secretary: L. Vavriv, PhD. Phys.-Math. Sci., Senior Researcher.

Members of the Editorial board: M. Baranov, Dr. Tech. Sci., Main Researcher – deputy editor-in-chief;

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

B. Klimenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. Knyazev, PhD. Tech. Sci., Leading Researcher;

E. Sokol, Dr. Tech. Sci., Prof.; I. Yakovenko, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof.;

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

F. D'Alessandro, PhD, SMIEEE, PhysElec, Tasmania, Australia; S. Grzybowski,

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

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

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

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

Protocol number 7, September, 21, 2017

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Збірник наукових праць

Серія:
Техніка та електрофізика високих напруг

№ 38 (1260) 2017

Науковий редактор: д-р техн. наук, проф. В. І. Кравченко
Технічний редактор: канд. фіз.-мат наук, ст. наук. співр. Л. В. Ваврів
Відповідальний за випуск: канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.
НТУ «ХПІ». НДПКІ «Молнія».
Тел. (057) 707-63-09. E-mail: l.v.vavriv@gmail.com

Обл.-вид № 27-17.

Підп. до друку 25.10.2017 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,75. Облік.-вид. арк. 10.
Тираж 300 пр. 1-й завод 1-100. Зам. № 23. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Друкарня ВАТ «Цифра Прінт».

Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 03.08.2009 р.

Адреса: 61166, м. Харків, вул. Данилевського, 30

ЗМІСТ

Баранов М.И. Расчетная оценка основных физико-технических характеристик плазмы в локальной зоне воздушного электрического взрыва металлического проводника под воздействием большого импульсного тока	5
Князев В.В., Иванов В.М., Таницура А.И. Испытания устойчивости калькулятора к воздействию ЭМИ наносекундного диапазона	10
Князев В.В., Мельник С.И., Шаламов С.П. Методика расчетной оценки пространственного распределения амплитудно-временных параметров электромагнитного импульса в полеобразующей системе полоскового типа	18
Кравченко В.И., Ваврив Л. В., Яковенко И. В. Возбуждение геликонов в полупроводниковых структурах в условиях воздействия ЭМИ	33
Кравченко В.И., Ваврив Л. В., Яковенко И. В. Взаимодействие магнитоплазменных колебаний с источниками электромагнитного излучения	38
Кравченко В.И., Ваврив Л. В., Яковенко И. В. Поверхностные плазменные волны на неоднородной границе полупроводника	45
Кускова Н.И., Челпанов Д.И., Корзинова А.Н. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез металлоуглеродных наноматериалов	50
Немченко Ю. С. Возможность проведения в НИПКИ «Молния» испытаний на молниестойкость по стандарту MIL-STD-461G	55
Петриченко С. В., Цолін П. Л., Сінчук А. В. Вплив попередньої електророзрядної обробки біосировини на основні показники метаногенезу	61
Петриченко С. В., Цолін П. Л., Сінчук А. В. Обладнання та режими для електророзрядної обробки біомаси	69
Руденко С. С. Аналіз можливості застосування існуючих приладів зондування ґрунту в рамках діагностики стану заземлювального пристрою	75
Старков Н. В., Стрелковская Л. И. Экспериментальное исследование импульсной электрогидравлической калибровки листовых деталей из высокопрочной стали	79
Шутенко О. В. Анализ особенностей газосодержания масел в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения	84

CONTENTS

Baranov M.I. Calculation estimation of the main physical and technical characteristics in local zone of air electrical explosion of metal-lic conductor under the influence of high pulsed current	5
Kniaizev V.V., Ivanov V.M., Tancura A.I. A practical example of determination of immunity of equipment to action of EMP of nanosecond range	10
Kniaizev V.V., Mel'nik S.I., Shalamov S.P. Numerical simulation of spatial distribution of amplitude-time parameters of electromagnetic pulse in field-forming systems of stripline type	18
Kravchenko V., Vavriv L., Yakovenko I. Helicon Excitation in Semiconductor Structures Exposed to EMP	33
Kravchenko V., Vavriv L., Yakovenko I. Interaction of Magnetoplasma Oscillations with Sources of Electromagnetic Radiation	38
Kravchenko V., Vavriv L., Yakovenko I. Surface Plasma Waves at Heterogeneous Boundary of Semiconductor	45
Kuskova N.I., Chelpanov D.I., Korzinova A.N. Self-propagating high-temperature synthesis of metal-carbon nanomaterials	50
Nemchenko Yu.S. Possibility to carry out tests for lightning immunity according to standard MIL-STD-461G in RDI «Molniya»	55
Petrichenko S.V., TsoLin P.L., Synchuk A.V. Influence of preliminary electrodischarge treatment of biomass on the main indicators of methanogenesis	61
Petrichenko S.V., TsoLin P.L., Synchuk A.V. Equipment and regimes for electrodischarge processing of biomass	69
Rudenko S.S. Analysis of possibility to using existing devices for soil sensing in the diagnostics of the state of the grounding grids	75
Starkov M.V., Ctrelkovs'ka L.I. Experimental studies of pulse electrohydraulic calibration of sheet parts made of high-strength steel	79
Shutenko O.V. Analysis of peculiarities of gas content of oils in defect-free transformers of untight construction	84

УДК 621.3.015.52 : 621.3.022

М.И. БАРАНОВ**РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ В ЛОКАЛЬНОЙ ЗОНЕ ВОЗДУШНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОВОДНИКА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ БОЛЬШОГО ИМПУЛЬСНОГО ТОКА**

Приведені результати наближеного визначення амплітуди P_{mB} плазодинамічного тиску, мінімальної середньооб'ємної температури T_{mB} і мінімальної швидкості v_{mB} ударної хвилі в локальній зоні повітряного електричного вибуху (ЕВ) металевого провідника під дією великого імпульсного струму (ВІС). Розрахункова оцінка чисельних значень P_{mB} , T_{mB} і v_{mB} по запропонованим формулам вказує на те, що при повітряному ЕВ металевого провідника з ВІС в локальній зоні подібного вибуху може виникати тиск в десятки і сотні атмосфер, температура плазмових продуктів від вибуху може досягати десятків тисяч градусів кельвіна, а швидкість ударної хвилі в плазмових продуктах ЕВ металу може наблизитися до швидкостей детонаційної хвилі в газових і твердих вибухових речовинах.

Ключові слова: великий імпульсний струм, металевий провідник, повітряний електричний вибух провідника, тиск, температура і швидкість ударної хвилі в плазмових продуктах електричного вибуху, розрахункова оцінка параметрів електричного вибуху.

Приведены результаты приближенного определения амплитуды P_{mB} плазодинамического давления, минимальной средней температуры T_{mB} и минимальной скорости v_{mB} ударной волны в локальной зоне воздушного электрического взрыва (ЭВ) металлического проводника под воздействием большого импульсного тока (БИТ). Расчетная оценка численных значений P_{mB} , T_{mB} и v_{mB} по предложенным формулам указывает на то, что при воздушном ЭВ металлического проводника с БИТ в локальной зоне подобного взрыва могут возникать давления в десятки и сотни атмосфер, температура плазменных продуктов от взрыва может достигать десятков тысяч градусов кельвина, а скорость ударной волны в плазменных продуктах ЭВ металла может приближаться к скоростям детонационной волны в газовых и твердых взрывчатых веществах.

Ключевые слова: большой импульсный ток, металлический проводник, воздушный электрический взрыв проводника, давление, температура и скорость ударной волны в плазменных продуктах электрического взрыва, расчетная оценка параметров электрического взрыва.

The results of approximate estimation of the amplitude P_{mB} of plasma dynamic pressure, minimal average volume temperature T_{mB} and minimal velocity v_{mB} of shock wave in the local zone of air electric explosion (EE) of metallic conductor under the influence of high pulsed current (HPC) are presented. The calculation estimation of the numerical values of P_{mB} , T_{mB} and v_{mB} by the proposed formulae indicates that pressures of tens and hundreds of atmospheres can arise as a result of EE of metallic conductor with HPC in the local zone of such explosion, the temperature of plasma products of such explosion can reach tens of thousands of Kelvin's, and shock wave velocity in the plasma products of EE of the metal can approach the velocities of detonation wave in gaseous and solid explosives.

Key words: large impulsive current, metallic explorer, air electric explosion of explorer, pressure, temperature and speed of shock wave, is in the plasma products of electric explosion, calculation estimation of parameters of electric explosion.

Введение. Явление электрического взрыва (ЭВ) металлического проводника под воздействием большого импульсного тока (БИТ) нашло достаточно широкое практическое применение в экспериментальной физике, атомной технике при подрыве зарядов боеголовок ядерного и термоядерного оружия (в устройствах их синхронно срабатывающих с высокой точностью электродетонаторов обычных твердых взрывчатых веществ, обжимающих подкритическую массу ядерного заряда с целью получения из нее сверхкритической массы и подрыва заряда), прикладной электрофизике (при изучении свойств плазмы, образовавшейся при ЭВ металла), технике высоких напряжений (в схемах испытаний на молниестойкость некоторых видов высоковольтной изоляции, включая деревянные конструкции) и технике БИТ (в качестве быстрых размыкателей силовых цепей), технике мощных источников света и ряде современных электротехнологий по получению микро- и нанопорошков для создания новых композиционных материалов и в высокоскоростной ударной обработке жидких и твердых сред [1-9]. Научному и инженерно-техническому персоналу, осуществляющему ЭВ металлических проволочек

(наиболее часто в воздухе и воде), необходимы приближенные формулы для оперативной расчетной оценки таких параметров в локальной зоне рассматриваемого взрыва, как [4,5]: амплитуды P_{mB} плазодинамического давления, минимальной температуры T_{mB} и минимальной скорости v_{mB} распространения ударной волны в плазменных продуктах («металлической плазме») их ЭВ. Кроме того, укажем, что подобная техническая информация необходима и специалистам, занимающимся испытаниями объектов аэрокосмической техники и энергетики на стойкость к воздействию на них импульсного тока молнии, амплитудно-временные параметры (АВП) которого могут характеризоваться амплитудами до ± 220 кА и длительностями его протекания до 1000 мс [8]. В используемых при этом высоковольтных испытательных схемах могут оказаться «узкие» проводящие места, которые являются потенциально опасными для ЭВ. В этой связи получение расчетных соотношений для приближенного определения указанных параметров P_{mB} , T_{mB} и v_{mB} является актуальной прикладной научно-технической задачей.

Целью статьи является получение приближенных расчетных соотношений для определения амплитуды P_{mB} давления ударной волны, минимальной температуры T_{mB} и минимальной скорости v_{mB} распространения ударной волны в плазменных продуктах воздушного ЭВ металлического проводника под воздействием БИТ.

1. Постановка прикладной задачи. Рассмотрим тонкий металлический проводник плоской или цилиндрической геометрической формы, по которому в его продольном направлении от высоковольтного импульсного источника энергии (например, от мощной предварительно заряженной конденсаторной батареи) протекает БИТ, АВП которого достаточны для достижения в электропроводящей структуре проводника численного значения интеграла тока J_k , являющегося критическим для исследуемого проводника с тем или иным видом его материала. Например, для медного проводника, находящегося в воздухе при комнатной

температуре 20 °С, величина $J_k = \int_0^{t_k} \delta^2(t) dt$, где $\delta(t)$ –

плотность тока в проводнике, а t_k – момент времени наступления ЭВ проводника, численно составляет около $J_k \approx 1,95 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$ [3]. При достижении в материале проводника указанного значения J_k его проводящая структура с температурой не менее температуры ее кипения T_k (например, для меди $T_k \approx 2590$ °С [10]) будет подвергаться быстрому испарению и сублимации. В локальной зоне ЭВ проводника будут образовываться мелкодисперсные плазменные продукты такого взрыва с превалирующей вначале для них электронной температурой T_e , генерирующие фронт ударной волны в воздухе, окружающем проводник. Считаем, что в возникающем ионизированном квазинейтральном газе («металлической плазме»), состоящем из «электронного газа» и «ионного газа», за характерное время длительности протекания по проводнику тока (например, до 500 мкс для импульсной А-компоненты тока искусственной молнии, формируемой генератором тока молнии [8,11]) наступает равновесное состояние, при котором электронная температура T_e приближается к ионной T_i . (плазма становится практически изотермической) В рассматриваемом нами приближении исходный воздух и «металлическую плазму», образовавшуюся вместо твердого тела исследуемого проводника, принимаем в качестве идеальных газовых сред, удовлетворяющих классическому понятию «идеального газа» с занимаемым им ограниченным объемом [12]. Полагаем, что до протекания по рассматриваемому проводнику БИТ окружающий его воздух находился в нормальном состоянии и имел следующие характеристики [12]: давление воздуха составляло $P_1 \approx 1,013 \cdot 10^5$ Па; температура воздуха была равной $T_1 \approx 273,15$ К; молярный объем воздуха составлял $V_{M1} \approx 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$. Ограничимся рассмотрением квазистатического адиабатического процесса в рассматриваемой локальной зоне металлического проводника с протекающим по нему БИТ, при котором в занимаемой ею (зоной) ограниченном объеме V_0 не будут происходить процессы теплообмена с

окружающей проводник воздушной средой.

Требуется с учетом принятых допущений в приближенном виде получить расчетные соотношения для инженерной оценки амплитуды P_{mB} плазмодинамического давления, минимальной температуры T_{mB} и минимальной скорости v_{mB} распространения ударной волны в плазменных продуктах воздушного ЭВ металлического проводника под действием протекающего по нему БИТ, обеспечивающего достижение в его электропроводящей структуре критического значения интеграла тока J_k .

2. Расчетная оценка амплитуды P_{mB} плазмодинамического давления в продуктах ЭВ проводника. На основании принятых допущений и уравнения состояния идеального газа, соответствующего уравнению Клайперона-Менделеева [12], для одного моля воздушной среды, окружающей исследуемый проводник до воздействия на него БИТ, и одного моля «металлической плазмы» после воздушного ЭВ данного проводника можно записать следующее газовое равенство:

$$P_1 V_{M1} / T_1 = P_2 V_{M2} / T_2 = R, \quad (1)$$

где P_2 , T_2 и V_{M2} – соответственно давление, абсолютная температура и молярный объем плазменных продуктов в локальной зоне воздушного ЭВ металлического проводника, вызванного действием на него БИТ; $R = 8,314$ Дж/(К·моль) – универсальная газовая постоянная [10].

В (1) для левой части приведенного равенства такие ее параметры как P_1 , T_1 и V_{M1} являются исходными с заданными численными значениями. Пока неизвестными для нас параметрами в (1) являются P_2 , T_2 и V_{M2} . Именно величина P_2 из (1) и будет определять максимальное значение (амплитуду) P_{mB} плазмодинамического давления, возникающего в локальной зоне ЭВ принятого нами металлического проводника. Прежде чем записывать на основе (1) аналитическое соотношение для определения параметра $P_2 = P_{mB}$, остановимся на расчетной оценке параметра V_{M2} , входящего в равенство (1).

Согласно [12] под параметром V_{M2} , определяющим объем одного моля «металлической плазмы» после воздушного ЭВ металлического проводника, понимается величина, рассчитываемая по следующему выражению:

$$V_{M2} = (M_2 + M_1) / d_2, \quad (2)$$

где M_1 , M_2 – соответственно молярная масса исходного воздуха и образовавшихся в нем плазменных продуктов в локальной зоне воздушного ЭВ металлического проводника; d_2 – плотность плазменных продуктов, образовавшихся в рассматриваемой воздушной локальной зоне после ЭВ проводника под воздействием БИТ.

Молярную массу M_2 , имеющую в системе СИ размерность кг/моль [12], для лучшего понимания читателем положений молекулярной физики и наглядности найдем для случая, связанного с воздушным ЭВ тонкого медного проводника. В этом случае величину M_2 будут определять не- и ионизированные атомы меди ${}_{29}^{63}\text{Cu}$ (влиянием «электронного газа» в «металлической плазме» на искомую величину M_2 в рассматриваемом приближении можно пренебречь). Тогда для M_2 можно записать [12]:

$$M_2 \approx 63,55 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Величина молярной массы $M_1 \approx V_{M1} \cdot d_1$ для исходного воздуха в исследуемом случае будет численно примерно равной

$$M_1 \approx 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль} \cdot 1,293 \text{ кг/м}^3 \approx \\ \approx 28,97 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Что касается плотности d_2 «металлической плазмы» в (2), имеющей в системе СИ размерность кг/м^3 , то ее определение выполним сравнительным путем по отношению к плотности d_1 окружающего проводник исходного воздуха, численно равной при нормальных атмосферных условиях $d_1 \approx 1,293 \text{ кг/м}^3$ [10]. Для исследуемых плотностей идеальных газов (d_1 и d_2) и их молярных масс (M_1 и M_2) в локальной зоне воздушного ЭВ металлического провода с учетом закона Дальтона для смеси идеальных газов будет справедливо соотношение [12]:

$$d_2 / d_1 \approx (M_2 + M_1) / M_1. \quad (3)$$

В результате из (3) для электрически взрывающегося под воздействием БИТ медного проводника получаем, что

$$d_2 \approx 1,293 \text{ кг/м}^3 \cdot (63,55 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} + \\ + 28,97 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}) \cdot (28,97 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль})^{-1} \approx \\ \approx 4,129 \text{ кг/м}^3.$$

Приведенные количественные данные впервые наглядным физико-химическим путем показывают, что «металлическая плазма», образовавшаяся от воздушного ЭВ тонкого медного проводника, всего примерно в 3,2 раза плотнее исходного воздуха, окружающего при нормальных атмосферных условиях проводник до его ЭВ. В результате из (2) при $d_2 \approx 4,129 \text{ кг/м}^3$ следует, что величина молярного объема V_{M2} «металлической плазмы» принимает численное значение, равное

$$V_{M2} \approx (63,55 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} + 28,97 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}) \cdot \\ \cdot (4,129 \text{ кг/м}^3)^{-1} \approx 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль.}$$

Видно, что полученное на основе законов идеального газа численное значение молярного объема V_{M2} для «металлической плазмы» равно классическому численному значению молярного объема V_{M1} для исходного воздуха.

С учетом полученного достаточно простым и наглядным физико-химическим путем равенства $V_{M2} \approx V_{M1}$ из (1) для искомой величины амплитуды $P_2 = P_{mB}$ плазмосинопического давления в локальной зоне воздушного ЭВ металлического проводника с БИТ получаем:

$$P_{mB} = P_1 T_2 / T_1. \quad (4)$$

Из (4) явствует, что при известных исходных данных для параметров воздушной среды P_1 и T_1 для нахождения количественного амплитудного значения возникающего ударного давления в локальной зоне воздушного ЭВ металлического проводника необходимо знать уровень абсолютной температуры T_2 в плазменных продуктах, возникающих после сублимации проводника.

3. Расчетная оценка минимальной температуры T_{mB} в плазменных продуктах ЭВ проводника. Для нахождения абсолютной минимальной среднеобъемной температуры $T_{mB} = T_2$ «металлической плазмы» воздушного ЭВ металлического проводника с БИТ воспользуемся следующим приближенным соотношением [13]:

$$T_{mB} \approx [J_k (1 + \Delta T_k c_0 \beta_0)] / (c_0 \gamma_0) + 273,15, \quad (5)$$

где $\Delta T_k = (T_k - T_1)$ – минимальное критическое превы-

шение температуры материала проводника с БИТ; T_k – температура кипения материала проводника [12]; c_0 – удельная теплоемкость материала проводника, отнесенная к единице его объема, до протекания по нему БИТ [3]; β_0 – тепловой коэффициент удельной электропроводности материала проводника до воздействия на него БИТ [3]; γ_0 – удельная электропроводность материала проводника до протекания по нему БИТ [3].

Расчетная оценка по (5) значения абсолютной температуры $T_{mB} = T_2$ «металлической плазмы» при ЭВ медного проводника ($\gamma_0 \approx 5,81 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; $c_0 \approx 3,92 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$; $\beta_0 \approx 1,31 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Дж}$; $T_k \approx 2590 \text{ °C}$; $T_1 \approx 0 \text{ °C}$; $J_k \approx 1,95 \cdot 10^{17} \text{ А}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$ [3]) показывает, что она численно достигает уровня 12517 К. Полученное по (5) расчетное значение абсолютной минимальной среднеобъемной температуры T_{mB} для плазменных продуктов при воздушном ЭВ тонкого медного проводника удовлетворительно согласуется с результатами высоковольтных силовых экспериментов, приведенными в [4,14]. Следует напомнить читателю о том, что в [3] приведены опытные численные значения критического интеграла тока J_k , только для алюминиевых и медных проводников. Автором в [15] были приведены данные для расчета величины J_k для иных проводниковых материалов, используемых в технике БИТ при ЭВ тонких металлов, когда плотность δ тока в них составляет $\delta \geq 10^{10} \text{ А/м}^2$.

Используя полученные выше оценочные численные данные расчетов по (5) температуры $T_{mB} = T_2$ для «металлической плазмы» при воздушном ЭВ тонкого медного проводника, из (4) при $P_1 \approx 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (примерно 1 атм), $T_1 \approx 273,15 \text{ К}$ (около 0 °C) и $T_2 \approx 12517 \text{ К}$ находим, что амплитуда ударного давления P_{mB} в локальной зоне электрически взрывающегося в воздухе «голого» проводника из меди достигает численного значения, равного около $46,42 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (примерно 45,82 атм). Обращаем внимание читателя на то, что при оценке уровня ударного давления P_{mB} нами было использовано лишь минимальное значение температуры T_{mB} плазмы. Имеются результаты теоретических исследований, свидетельствующие о том, что значения температуры «металлической плазмы» при ЭВ в вакууме тонкой литиевой проволоки (диаметром 0,127 мм и длиной 10 мм) в силовых цепи генератора наносекундных импульсов тока с запаасаемой в конденсаторной батарее электрической энергией в 100 кДж могут достигать «рекордных» уровней, составляющих около 113543 К [13]. В этой связи максимальные значения температуры «металлической плазмы» при ЭВ металлической проволоки могут на порядок превышать значения T_{mB} по (5). При этом согласно (4) соответственно возрастут на порядок и уровни ударного давления P_{mB} в плазме от ЭВ.

4. Расчетная оценка минимальной скорости v_{mB} распространения ударной волны в плазменных продуктах ЭВ проводника. В рассматриваемом здесь идеальном газе (как в исходном окружающем проводник до протекания по нему БИТ воздухе, так и в «металлической плазме» после ЭВ проводника под действием БИТ) с учетом распространяющихся в нем продольных удар-

ных волн, приводящих к возникновению в этом газе пространственных уплотнений и разрежений, минимальная скорость v_{mB} распространения подобных волн может быть оценена по следующему выражению [12]:

$$v_{mB} \approx (\gamma_a R T_{mB})^{1/2}, \quad (6)$$

где γ_a – безразмерный показатель адиабаты.

Из (6) видно, что при известном значении универсальной газовой постоянной R и найденном по (5) значении абсолютной минимальной температуры T_{mB} в плазменных продуктах после воздушного ЭВ металлического проводника определение искомой величины минимальной скорости v_{mB} ударной волны в «металлической плазме» будет сводиться к уточнению в рамках теории термодинамики численного значения показателя адиабаты γ_a . Согласно [12] безразмерная величина γ_a , определяющая в определенной мере протекание равновесных термодинамических процессов в идеальном газе, в общем случае является сложной функцией, зависящей от давления P_{mB} , объема V_0 и температуры T_{mB} . В рассматриваемом нами грубом приближении для оценочных расчетов скорости v_{mB} ударной волны в плазменных продуктах от воздушного ЭВ проводника можно ограничиться численным значением указанного показателя адиабаты, равным примерно $\gamma_a \approx 1$ [12].

Тогда из (6) для медного взрывающегося под воздействием БИТ тонкого проводника при $\gamma_a \approx 1$, $R = 8,314$ Дж/(К·моль) и $T_{mB} \approx 12517$ К с учетом того, что в рассматриваемом случае модуль $|1 \text{ моль}| \approx 63,55 \cdot 10^{-3}$ кг получаем, что минимальная скорость v_{mB} распространения в «металлической плазме» ударной волны будет численно составлять около 1279,7 м/с. Данное численное значение скорости v_{mB} ударной волны в образовавшейся за счет ЭВ плазме будет превышать скорость звука в воздухе при нормальных атмосферных условиях, равную $v_B \approx 331,6$ м/с [12], примерно в 3,8 раза. Укажем, что такие численные значения скорости v_{mB} ударной волны в плазменных продуктах ЭВ тонкого металла становятся соизмеримыми со скоростями детонационной волны в газовых и твердых взрывчатых веществах [9,10]. Кроме того, отметим, что полученное по (6) расчетное численное значение скорости $v_{mB} \approx 1279,7$ м/с ударной волны в плазменных продуктах воздушного ЭВ тонкой меди при его сравнении с экспериментально определенным численным значением скорости звука $v_B \approx 331,6$ м/с в исходном воздухе (при показателе ее увеличения примерно в 3,8 раза) удовлетворительно согласуется (в пределах расхождения до 16 %) со степенью увеличения (примерно в 3,2 раза) плотности d_2 «металлической плазмы» по отношению к плотности d_1 исходного воздуха, окружающего при нормальных атмосферных условиях исследуемый металлический проводник. К этому следует добавить то одно общее физическое положение, что чем плотнее среда, тем в ней выше скорость распространения продольных (звуковых) волн [10,12].

Выводы. 1. На основании классических положений электрофизики, молекулярной физики, теплофизики, физики плазмы, механики и термодинамики предложены приближенные соотношения (4), (5) и (6) соответственно для оценочных расчетов амплитуды P_{mB} плазмодинамического давления, минимальной

температуры T_{mB} и минимальной скорости v_{mB} распространения ударной волны в «металлической плазме» при воздушном ЭВ металлического проводника, испытывающего в высоковольтной силовоточной разрядной цепи мощного генератора импульсных токов воздействие БИТ.

2. С учетом закономерностей идеального газа в первом приближении впервые расчетным путем показано, что плотность «металлической плазмы», возникающей при воздушном ЭВ медного проводника, лишь примерно в 3,2 раза превышает плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях, окружающего исследуемый металлический проводник с БИТ до его ЭВ.

3. Амплитуда P_{mB} плазмодинамического давления в локальной зоне воздушного ЭВ металлического проводника может численно составлять десятки и сотни атмосфер, приводящих к возможному механическому разрушению или повреждению расположенных вблизи него элементов конструкций электроустановки.

4. Абсолютная минимальная среднеобъемная температура T_{mB} «металлической плазмы» в локальной зоне воздушного ЭВ тонкого металлического проводника под воздействием БИТ достигает численных значений в десятки тысяч градусов кельвина.

5. Минимальная скорость v_{mB} ударной волны в «металлической плазме» при воздушном ЭВ тонкого металлического проводника из-за действия на него БИТ может принимать численные значения в несколько тысяч метров в секунду, соизмеримые со скоростями детонационной волны в газовых и твердых взрывчатых веществах. Данный результат может указывать на целесообразность применения воздушного ЭВ тонкой металлической проволочки в электродетонаторах, предназначенных для синхронного подрыва боезарядов различных конструкций с обычной и ядерной взрывчаткой.

Список литературы:

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника / Г.А.Месяц. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
2. Даиук П.Н. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / П.Н.Даиук, С.Л.Зайенц, В.С.Комельков, Г.С.Кучинский, Н.Н.Николаевская, П.И.Шкуронат, Г.А. Шнейерсон. Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
3. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г.Кнопфель. Пер. с англ. Ф.А. Николаева, Ю.П. Свириденко. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
4. Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии / Н.Н.Столович. Под ред. В.Н. Карношина. – Минск: Наука и техника, 1983. – 151 с.
5. Бурцев В.А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В.А.Бурцев, Н.В.Калинин, А.В.Лучинский. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
6. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий / Г.А.Гулый. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с.
7. Лернер М.И. Образование наноразмерной фазы при электрическом взрыве проводников / М.И.Лернер // Известия ВУЗов. Физика. – 2006. – Том 49, № 6. – С. 91–95.
8. Баранов М.И. Основные характеристики электрического взрыва металлического проводника при больших импульсных токах / М.И.Баранов, В.О. Лысенко // Электричество. – 2013. – № 4. – С. 24–30.
9. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 40: Научное открытие метода взрывной имплозии для получения сверхкритической массы ядерного заряда и украинский «след» в американском атомном проекте «Манхэттен» / М.И. Баранов // Электротехніка і

електромеханіка. – 2017. – № 5. – С.3–13.

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

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

12. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / В.Е. Кузьмичев. Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.

13. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Монография в 3 томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач / М.И. Баранов. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с.

14. Ильин Г.Г. Определение температуры и других параметров плазмы взрывающейся проволоки по самообращенным спектральным линиям и спектрам поглощения / Г.Г. Ильин, Э.М. Нурматов, И.С. Фишман // Теплофизика высоких температур. – 1975. – Т. 13, № 2. – С. 288–294.

15. Баранов М.И. Аналитический расчет критических значений интеграла тока для основных металлов, применяемых в технике больших импульсных токов при электрическом взрыве проводников / М.И. Баранов // Технична електродинаміка. – 2008. – № 6. – С. 14–17.

Bibliography (transliterated):

1. Mesyats G.A. Impul'snaya energetika i elektronika [Pulsed power and elektronika]. Moscow, Publ. Nauka, 2004, 704 p.

2. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskiy G.S., Nikolayevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej. Pod red. V.S. Komel'kova [The technique of large pulsed currents and magnetic fields. Under ed. V.S. Komel'kov]. Moscow, Publ. Atomizdat, 1970, 472 p.

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

4. Stolovich N.N. Elektrovzryvnye preobrazovateli energii [The electro-explosive transformers of energy. Under ed. V.N. Karnyushin]. Minsk, Science and technique, 1983, 151 p.

5. Burtsev V.A., Kalinin N.V., Luchinskiy A.V. Elektricheskiy vzryv provodnikov i ego primeneniye v elektrofizicheskikh ustanovkakh [The electric explosion of explorers and his application in electrophysics options]. Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1990, 288 p.

6. Guliy G.A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologiy [Scientific foundations of discharge-impulse technologies]. Kiev, Publ. Naukova dumka, 1990, 208 p.

7. Lerner M.I. Obrazovanie nanorazmernoy phazy pri elektricheskom vzryve provodnikov [Formation of nano-sizes phase

at the electric explosion of explorers]. Izvestiya VUZov. Fizika-Information of Institutes of higher. Physics, 2006, Vol. 49, No. 6, pp.91–95.

8. Baranov M.I., Lysenko V.O. Osnovnye karakteristiki elektricheskogo vzryva metalicheskogo provodnika pri bol'shih impul'snyh tokah [Basic descriptions of electric explosion of metallic exploder at large impulsive currents]. Elektrichestvo–Electricity, 2013, No. 4, pp.24–30.

9. Baranov M.I. Antologija vydajushhihsja dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 40: Nauchnoe otkrytie metoda vzryvnoy implozii dlja poluchenija sverhkriticheskoy massy jadernogo zarjada i ukrainskiy «sled» v amerikanskom atomnom proekte «Manhjetten» [Anthology of outstanding achievements in science and technique. Part 40: Scientific discovery of the explosive implosion method for obtaining a supercritical mass of a nuclear charge and the Ukrainian "trace" in the American atomic project «Manhattan»]. Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2017, No. 5, pp.3–13.

10. Kuhling H. Spravochnik po fizike: Per. s nem. pod red. E.M. Lejkina [Handbook of physics: Trans. with it. ed. E.M. Leykin]. Moscow, Publ. Mir, 1982, 520 p.

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

12. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki. Отв. ред. В.К. Тартаковский [The laws and formulas of physics. Editor. Ed. V.K. Tartakovskiy]. Kiev, Publ. Naukova dumka, 1989, 864 p.

13. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 3 tomah. Том 2, Кн. 1: Teorija elektrofizicheskikh efektov i zadach [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 3 Volume. Vol. 2, Book 1: The theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkiv, Publ. NTU "KhPI", 2009, 384 p.

14. Il'in G.G., Nurmatov E.M., Fishman I.S. Opredeleniye temperatury I drugih parametrov plazmy vzryvayushcheysya provolochki po samoobrashchennym spektral'nym liniyam i spektram pogloshcheniya [Determination of temperature and other parameters of plasma of bursting delay on the automatically turned spectral lines and spectrums of absorption]. Teplofizika vysokih temperatur – Termophysics of high temperatures, 1975, Vol. 13, No. 2, pp.288-294.

15. Baranov M.I. Analiticheskiy raschet kpiticheskikh znacheniy integrala toka osnovnykh metallov, primenyaemykh v tehnikе bol'shih impul'snyh tokov pri elektricheskom vzryve provodnikov [Analytical calculation of critical values of integral of current for parent metals, applied in the technique of large impulsive currents at the electric explosion of explorers]. Tekhnichna elektrodinamika – Technical electrodynamic, 2008, No. 6, pp.14–17.

Поступила (received) 14.08.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розрахункова оцінка основних фізико-технічних характеристик плазми в локальній зоні повітряного електричного вибуху металевого провідника під дією великого імпульсного струму / М.І. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 5-9. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Расчетная оценка основных физико-технических характеристик плазмы в локальной зоне воздушного электрического взрыва металлического проводника под воздействием большого импульсного тока / М.И. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 5-9. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Calculation estimation of the main physical and technical characteristics in local zone of air electrical explosion of metallic conductor under the influence of high pulsed current / M.I. Baranov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 5-9. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

Baranov Michail Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Main Researcher, NDPKI "Molniya" NTU "KhPI"; tel.: (057) 707-68-41, e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua.

УДК 621.317.3

В. В. КНЯЗЕВ, В. М. ИВАНОВ, А. И. ТАНЦУРА**ИСПЫТАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ КАЛЬКУЛЯТОРА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭМИ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА**

Представлено результати випробувань стійкості електронного калькулятора до впливу електромагнітного імпульсу з параметрами, які відповідають вимогам MIL-STD-461G (процедура RS105). Випробування проведені з використанням технічного забезпечення Еталону одиниць сильних імпульсних електричних і магнітних полів. Результати випробувань показали, що вже при напруженості електричного поля ЕМІ рівній 17,7 кВ/м проявляється ефект обнулення інформації на екрані калькулятора.

Ключові слова: стійкість, електромагнітний імпульс, електронний калькулятор, генератор ЕМІ.

Представлены результаты испытаний устойчивости электронного калькулятора к воздействию электромагнитного импульса с параметрами, соответствующими требованиям MIL-STD-461G (процедура RS105). Испытания проведены с использованием технического обеспечения Эталона единиц сильных импульсных электрических и магнитных полей. Результаты испытаний показали, что уже при напряженности электрического поля ЭМИ равной 17,7 кВ/м проявляется эффект обнуления информации на экране калькулятора.

Ключевые слова: устойчивость, электромагнитный импульс, электронный калькулятор, генератор ЭМИ.

Results of tests for immunity of electronic calculator to action of electromagnetic pulse with parameters corresponding to the requirements of MIL-STD-461G (procedure RS105) are presented. The tests were carried out with use of hardware of the Primary standard of units of strong pulsed electric and magnetic fields. For this purpose, additionally, the generator of EMP supplying the specified amplitude-time parameters of a pulse, connected in the system of the Primary standard of REMP instead of the generator of exponential pulses, was made. The results of the tests showed that effect of nulling of information at the calculator screen takes place already at electric field strength of EMP of 17,7 kV/m, but its serviceability remains intact. When electric field was 35.2 kV/m serviceability of the calculator was broken (the screen went out, without possibility to recover serviceability by «turn on-turn off» operation). Analysis showed that the failure was caused by degradation of the controller.

Key words: immunity, electromagnetic pulse, electronic calculator, generator of EMP.

Введение

Процедура RS105 стандарта MIL-STD-461G [1] предназначена для испытания устойчивости отдельных блоков и автономных образцов технических средств. Требуемые размеры испытательного объема связаны с габаритными размерами испытываемого изделия. Для ТС, максимальный габаритный размер которых не превышает 0,15 м, в полной мере пригоден имитатор, описанный далее.

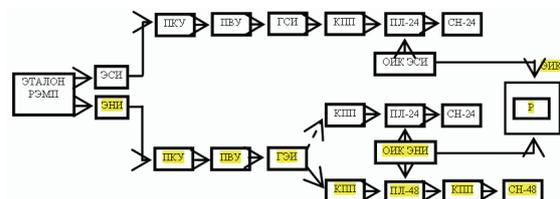
1 Тип имитатора

Имитатор ЭМИ реализован на базе эталона единиц физической величины напряженности импульсных электрических и магнитных полей (Эталон РЭМП) [2, 3]. структурная схема эталона РЭМП представлена на рис. 1.

Эталон представляет собой специализированную высоковольтную импульсную установку. Напряженность импульсного электрического поля, создаваемого в эталоне, лежит в диапазоне от 4 кВ/м до 200 кВ/м, а магнитного поля – в диапазоне от 10 А/м до 500 А/м. Длительность фронта импульсов менее 10^{-9} с.

Для целей данной работы использовался эталон наносекундных импульсов (ЭНИ), и другие элементы системы, которые выделены на рисунке 1 желтым. Генератор экспоненциальных импульсов (ГЭИ), был настроен на формирование импульсов с временными параметрами, соответствующими ЭМИ ЯВ, и обеспечивающим амплитуду напряженности электрического поля в диапазоне от 4 кВ/м до 60 кВ/м при использо-

вании ПЛ-48, что полностью удовлетворяет требованиям стандарта MIL-STD-461G [1]. Соответствующие осциллограммы представлены далее.



ЭСИ – эталон субнаносекундных импульсов ЭМП;
 ЭНИ – эталон наносекундных импульсов ЭМП;
 ПКУ – пульт контроля и управления;
 ПВУ – повысительно-выпрямительное устройство;
 ГСИ – генератор ступенчатых импульсов;
 ГЭИ – генератор экспоненциальных импульсов;
 КПП – коаксиально-полосковый переход;
 ПЛ-24 – полосковая линия с расстоянием между пластинами 0,24 м;
 ПЛ-48 – полосковая линия с расстоянием между пластинами 0,48 м;
 СН – согласующая нагрузка;
 ОИК – образцовый измерительный комплекс;
 Р – регистраторы;
 ЭИК – экранированная измерительная кабина

Рисунок 1 – Структурная схема Эталона РЭМП

Общий вид Эталона РЭМП приведен на рис. 2.

Две независимые части Эталона – ЭСИ и ЭНИ работают поочередно. Общими элементами ЭСИ и ЭНИ являются ПКУ, ПВУ, и ОИК с регистратором (Р), расположенным в экранированной измерительной кабине (ЭИК).

ПКУ (рис. 3) устанавливает вид работающего

Эталона, режим его работы (одиночный или частотный, ручной или автоматический), уровень зарядного напряжения и осуществляет контроль за функционированием всех задействованных элементов Эталона.



Рисунок 2 – Общий вид Эталона РЭМП



Рисунок 3 – Общий вид ПКУ

Генератор экспоненциальных импульсов (ГЭИ) состоит из высоковольтного емкостного накопителя энергии, представленного на рис. 4, управляемого газового разрядника и коаксиально-полоскового перехода на полеобразующую систему. Разрядник заполнен азотом под давлением от 5 до 8 атмосфер, что позволяет регулировать скорость коммутации. В этом случае, учитывая рабочее напряжение до 50 кВ, не потребовалось использование схемы Маркса для умножения выходного напряжения генератора.

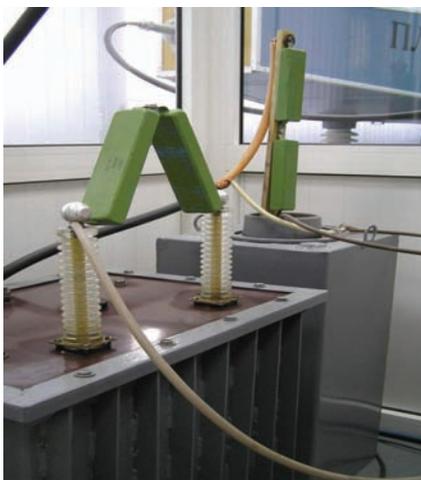
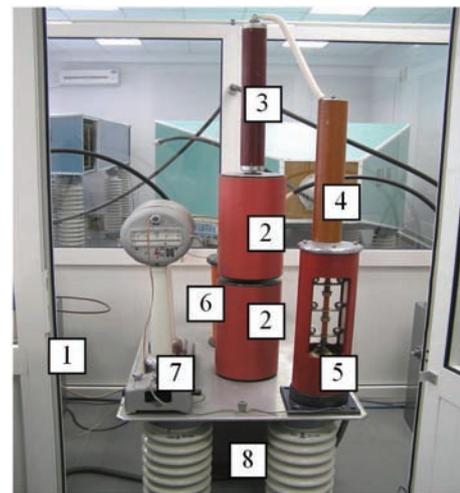


Рисунок 4 – Общий вид ГЭИ

Емкостной накопитель энергии заряжается от

ПВУ, на которое подается напряжение с ПКУ, до заданного уровня $U_{зар}$ в диапазоне от 2 кВ до 50 кВ. При достижении заданного уровня $U_{зар}$ на емкостном накопителе, с ПКУ подается напряжение на обмотку электромагнита разрядника. Происходит механическое замыкание электродов разрядника (разрядник срабатывает) и емкостной накопитель энергии разряжается на полеобразующую систему через коаксиально-полосковый переход (КПП). Полеобразующая система, выполнена в виде симметричной полосковой линии, с волновым сопротивлением 50 Ом. В полосковой линии формируется импульс экспоненциальной формы с заданными параметрами длительности фронта и спада.

В качестве первичного источника используется повысительно-выпрямительное устройство (ПВУ), обеспечивающее подачу высокого постоянного напряжения до 50 кВ, необходимого для заряда ГЭИ. ПВУ размещено в отдельном отсеке на подставке с размерами 1100x750x500 мм, ограниченной металлостеклянной перегородкой высотой 2 м., с запираемой дверью. На двери установлен путевой выключатель, предназначенный для аварийного отключения установки при открывании дверей. В этом же отсеке размещены - накопитель энергии для ГЭИ с разрядником. Внешний вид ПВУ показан на рис. 5, а расположение элементов ПВУ и ГЭИ внутри отсека – на рис. 6.

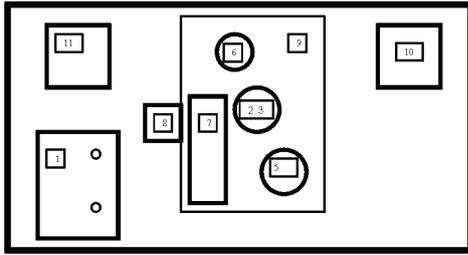


- 1 – высоковольтный трансформатор (слева, на фото не виден);
- 2 – вентиль высоковольтный; 3 – резистор зарядный;
- 4 – резистор защитный; 5 – короткозамыкатель;
- 6 – делитель напряжения; 7 – киловольтметр; 8 – конденсатор

Рисунок 5 – Повысительно-выпрямительное устройство

Вентиль высоковольтный предназначен для выпрямления напряжения и выполнен на базе четырнадцати последовательно соединенных выпрямительных столбов типа КЦ 201Д, параллельно каждому из которых подключен конденсатор типа ПОВ-15-390 пФ с целью равномерного распределения напряжения на вентильных столбах. Конструктивно вентиль собран в стеклоэпоксидном цилиндре.

Короткозамыкатель К-31 предназначен для замыкания высоковольтных цепей ПВУ и заземления емкости емкостного накопителя энергии по окончании работы или аварийном отключении.



1 – высоковольтный трансформатор; 2 – высоковольтный диод;
3 – зарядный резистор; 4 – защитный резистор;
5 – короткозамыкатель; 6 – омический делитель напряжения;
7 – киловольтметр; 8 – конденсатор ПВУ;
9 – панель для размещения элементов;
10 – емкостной накопитель ГСИ; 11 – емкостной накопитель ГЭИ

Рисунок 6 – Схема расположения элементов внутри отсека ПВУ и ГЭИ

Конструктивно К-31 содержит подвижный шток, на котором зафиксированы три пары последовательно включенных подвижных электродов и неподвижных контактов, которые образуют шесть высоковольтных контактов. Исходное положение короткозамыкателя – контакты замкнуты. При подаче напряжения на катушку электромагнита он срабатывает и через приводной механизм приводит к разрыву высоковольтных контактов и возможности подачи высокого напряжения на генераторы. При отключении питания электромагнита (в том числе и аварийного) подвижный контакт возвратится в исходное положение, осуществляя замыкание высоковольтных контактов. При таком положении высоковольтные цепи ГЭИ, ГСИ и ПВУ закорачиваются на землю.

Делитель постоянного напряжения типа Д-4 предназначен для использования в качестве первичного измерительного преобразователя совместно с цифровым вольтметром постоянного напряжения В2-22. Конструктивно Д-4 собран в стеклоэпоксидном цилиндре.

2 Тип полеобразующей системы

Основные требования к полеобразующей системе (ПС) – это создание E - и H -полей с равномерной структурой, четко известными направлениями векторов полей и легко рассчитываемыми амплитудами по геометрическим размерам ПС. Наиболее удовлетворяют этим требованиям ПС типа полосковых линий (ПЛ). ПЛ – это два достаточно длинных ленточных проводника толщиной d (как правило набираются из отдельных многожильных проводов), шириной b и длиной l , расположенных параллельно друг над другом на расстоянии h для которых выполняется требования (1) – (3):

$$b, l > h; \quad (1)$$

$$d \ll b, l, h; \quad (2)$$

$$\lambda < h, b, l, \quad (3)$$

где λ – эквивалентная длина волны.

Вдоль ПЛ распространяется плоская электромагнитная волна ТЕМ-типа, которая в любом поперечном сечении ПЛ имеет однозначное направление векторов \vec{E} и \vec{H} -полей, а их соотношение определяется формулами:

$$E/H = 120 \pi; \quad (4)$$

$$E = U / h, \quad (5)$$

где: U – напряжение, подаваемое с генератора на внутренний полосок, В;

h – расстояние между электродами ПЛ, м.

Элементами полеобразующей системы рассматриваемого имитатора ЭМИ ЯВ являются следующие основные узлы:

- коаксиально-полосковый переход (КПП 48-1);
- симметричная полосковая линия с $h = 0,48$ м (ПЛ-48);
- коаксиально-полосковый переход (КПП 48-2);
- согласующая нагрузка (СН 2).

Коаксиально-полосковый переход (КПП 48-1) служит для согласования полосковой линии ПЛ-48 с ГЭИ. КПП состоит из двух секций – конической и согласующей. Коническая секция представляет собой заполненный трансформаторным маслом конический переход длиной 0,6 м от коаксиального кабеля (РК 50-17-17) к волноводу с кругло-коаксиальным поперечным сечением, диаметр внешнего электрода 0,24 м. Согласующая секция длиной 2 м имеет воздушную изоляцию и является переходом от кругло-коаксиального тракта узла ввода к прямоугольно-коаксиальному тракту полосковой линии.

Полосковая линия с межэлектродным расстоянием $h = 0,48$ м (ПЛ-48) представляет собой симметричную полосковую линию замкнутого типа с горизонтальным участком длиной 3 м. Расстояние между электродами полосковой линии аттестовано службой Госстандарта Украины. Абсолютная погрешность составляет менее 1 мм. Общий вид полосковой линии ПЛ-48 показан на рис. 7. Следует отметить, что согласующие секции и полосковая линия выполнены из отдельных многожильных проводников. Вся конструкция обшита пластиком с относительной диэлектрической проницаемостью менее 1,2.

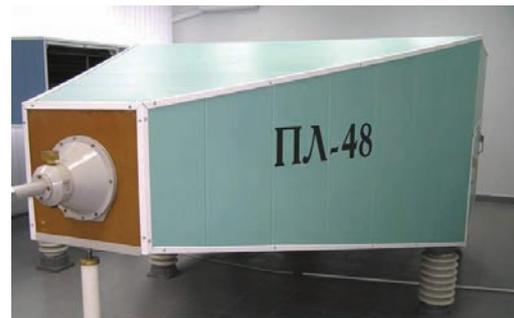


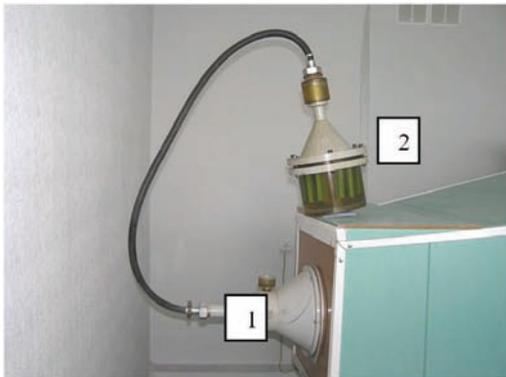
Рисунок 7 – Общий вид ПЛ-48 с КПП 48-1

Коаксиально-полосковый переход (КПП 48-2) служит для согласования полосковой линии ПЛ-48 с согласующей нагрузкой и конструктивно идентичен КПП 48-1.

На рис. 8 представлена согласующая нагрузка СН-2 (50 Ом), которая предназначена для согласования волнового сопротивления ПЛ-48, что обеспечивает минимизацию уровня отраженного сигнала.

При аттестации Государственного эталона РЭМП Российской Федерации, имеющего аналогичную структуру, доказано, что поле внутри ПЛ является

ТЕМ волной с высокой степенью однородности (погрешность менее 1,5 %) в рабочем объеме. Расчетное значение напряженности электрического поля, определяемое по формуле (5) отличается от истинного в пределах 3 %.



1 – Коаксиально-полосковый переход КПП 48-2;
2 – Согласующая нагрузка СН-2

Рисунок 8 – Общий вид КПП 48-2 с согласующей нагрузкой СН-2

Таким образом, измерение параметров ЭМИ ЯВ внутри ПЛ можно осуществлять датчиком полоскового типа СПЕФВ-ЕК с кабельной линией передачи информации.

3 Характеристики испытательной площадки

В соответствии с требованиями стандарта [1] размеры испытываемого изделия не должны превышать аттестованный испытательный объем имитатора. При использовании полосковой линии, объем ограничен такими значениями $(h/3, A/2, B/2)$, (h – расстояние между пластинами в горизонтальной части полеобразующей системы, A и B – длина и ширина полеобразующей системы). Основываясь на эти требованиях, характеристики испытательной площадки рассматриваемого имитатора ЭМИ ЯВ на базе эталона РЭМП составляют такой объем: по высоте – 0,16 м, по длине – 1,0 м, по ширине – 0,75 м).

4 Измерительное оборудование и схема размещения измерительной системы на имитаторе

Современные средства измерения импульсных электромагнитных процессов описаны в работах [4-6]. Измерительный комплекс входящий в состав имитатора обеспечивает измерение выходных параметров импульсного электрического и магнитного полей, создаваемых в рабочем объеме полосковой линии. Комплекс состоит из трех СИТ:

– СПЕФВ-ЕК с кабельной линией передачи информации для измерения электрической компоненты, представлен на рис. 9;

– СПЕФВ-ЕО с волоконно-оптической линией передачи информации для измерения электрической компоненты, представлен на рис. 10;

– СПЕФВ-НО с волоконно-оптической линией передачи информации для измерения магнитной компоненты.

Метрологическая аттестация СИТ проведена на

Государственном специальном эталоне во ФГУП ВНИИОФИ (Россия) в соответствии с положениями стандарта ГОСТ 8.540-2015. Метрологические характеристики СПЕФВ-ЕК, представлены в табл. 1.



Рисунок 9 – СПЕФВ-ЕК с кабельной линией передачи информации

Таблица 1 – Метрологические характеристики СПЕФВ-ЕК

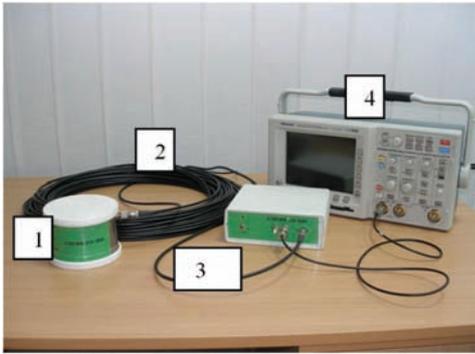
Наименование характеристики	Един. измерения	Величина
Коэффициент преобразования в диапазоне амплитудных значений $(4 \div 200)$ кВ/м	В/(В/м)	$4,82 \times 10^5$
Время нарастания переходной характеристики между уровнями 0,1 – 0,9 от установившегося значения при доверительной вероятности $P = 0,95$	нс	128 ± 12
Длительность переходной характеристики на уровне 0,5 установившегося значения амплитуды	нс	150
Доверительные границы относительной погрешности измерения коэффициента преобразования при доверительной вероятности 0,95	%	
– для первых 50 нс длительности ПХ		3,3
– для всей длительности ПХ		4,4

Аттестация испытательного объема Эталона РЭМП, проведена ФГУП ВНИИОФИ, с указанием степени неоднородности не более 3 %. Аттестация проведена с использованием СПЕФВ-ЕО, представленного на рис. 10.

СПЕФВ-ЕК располагается на нижней заземленной пластине полосковой системы. При этом нижняя поверхность преобразователя имеет нулевой потенциал. За счет малой толщины (3 мм) преобразователя искажения поля в ПЛ не происходит.

Через отверстие в нижней плоскости имитатора, линии связи от СПЕФВ отводятся вертикально вниз, где входят в металлическую трубу, идущую вдоль стены к измерительной экранированной кабине (ИЭК). Измерительная экранированная кабина имеет размеры $2,1 \times 1,45 \times 0,95 \text{ м}^3$. Стены, пол и потолок обшиты стальным листом, с дальнейшей проваркой стыковочных и соединительных швов, двери также металлические, с обеспечением полного гальваниче-

ского контакта по периметру. Внутри кабина обшита изоляционным материалом (фанера) с пенопластовой прослойкой.



1 – блок емкостного измерительного преобразователя (БЕИП);
2 – оптический кабель; 3 – блок фотоприемника (БФП);
4 – осциллограф Tektronix TDS-3052B

Рисунок 10 – Общий вид измерителя СПЕФВ-ЕО с регистратором

Регистрация сигнала осуществляется комплексом (Р), состоящим из двух цифровых запоминающих осциллографов: «Tektronix TDS 3052B» (полоса пропускания 500 МГц) и DPO 4104 (полоса пропускания 1000 МГц). ИЭК оснащена электрическим питанием, поступающим через фильтр и автономным источником питания от аккумуляторной батареи (в случае необходимости). Информация с осциллографов передается через внутреннюю сеть на персональный компьютер для дальнейшей обработки.

5 Оцифрованная временная реализация ЭМИ и частотный спектр

При проведении испытаний устойчивости выbranного образца ТС, регистрация параметров действующего ЭМИ осуществлялась с использованием СПЕФВ-ЕК, поскольку, только его время нарастания переходной характеристики (128 пс) обеспечивает погрешность измерений менее 1 %. В качестве регистратора использовался цифровой осциллограф DPO 4104, имеющий погрешность измерения не более 1 %.

Типовая осциллограмма напряженности импульсного электрического поля в ПЛ представлена на рис. 11. Расшифровка параметров напряженности электрического поля в ПЛ, представлена в табл. 2.

Примечания:

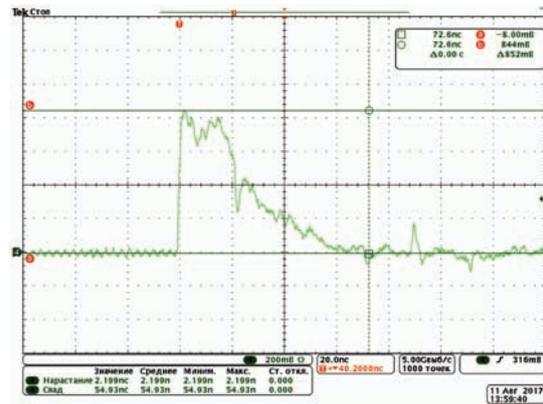
1. На осциллограмме (рис. 12) «спад» определен равным 54,9 нс. Это связано с тем, что осциллограф рассчитывает значение по уровню 0,1 от максимального.

2. Значение напряженности получено при зарядном напряжении генератора 15 кВ.

3.Изменение величины зарядного напряжения приводит к соответствующему изменению напряженности E-поля в ПЛ, без существенного изменения формы импульса.

Для получения спектрального состава импульса реализовано два варианта. Во-первых, использовалась опция осциллографа DPO 4104, осуществляющая быстрое Фурье преобразование по алгоритму Блекмана-

Харриса. Результат представлен на рис. 12 красной линией.

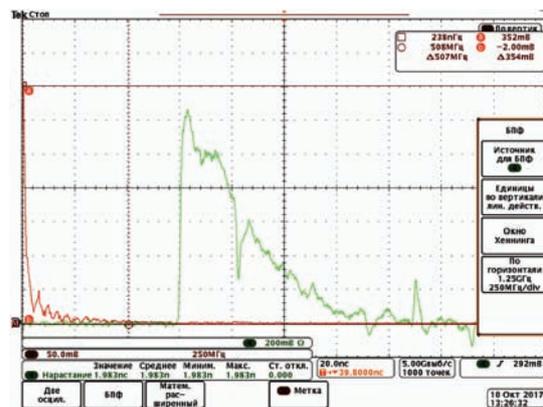


DPO4104 - 13:22:52 11.08.2017

Рисунок 11 – Осциллограмма напряженности электрического поля (при 15 кВ зарядного напряжения)

Таблица 2 – Параметры напряженности электрического поля

Наименование характеристики	Един. измерения	Значение величины
Значение напряженности	кВ/м	17,7
Время нарастания между уровнями 0,1 – 0,9 от максимального значения	нс	2,2
Длительность импульса на уровне 0,5 от максимального значения ¹⁾	нс	22,0
Доверительные границы относительной погрешности измерения значения напряженности при доверительной вероятности 0,95	%	3,3



DPO4104 - 13:26:21 10.10.2017

Рисунок 12 – Спектрограмма напряженности электрического поля (левая кривая) для характерного импульса ЭМИ (правая кривая)

Из анализа спектрограммы можно сделать вывод, что в спектре генерируемого импульса практически отсутствуют частоты ниже 100 МГц, максимум находится на частоте 250 МГц, а верхняя граничная частота равна 500 МГц.

6 Результаты испытаний

Для реализации процедуры оценки уровня устойчивости технического средства к действию ЭМИ, вы-

бран электронный калькулятор, представленный на рис. 13. Выбор основан на учете следующих обстоятельств. Габаритные размеры калькулятора соответствуют испытательному объему ПЛ-48. Качество функционирования в процессе испытаний легко проверяется без дополнительной диагностической аппаратуры. Изделие имеет автономное питание, поэтому, влияние трассировки кабеля питания исключено.

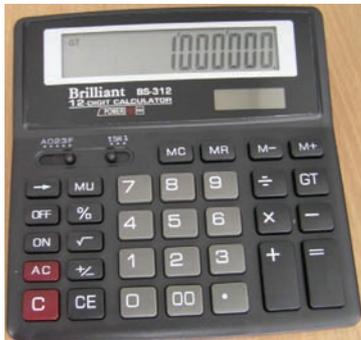


Рисунок 13 – Электронный калькулятор

При испытаниях ТС располагалось в испытательном объеме ПЛ в трех вариантах ориентации относительно вектора напряженности электрического поля, как показано на рис. 14. Очевидно, что это не все возможные варианты ориентаций ТС по отношению к векторам E и H полей. Выбор этих ориентаций обусловлен особенностью конструкции ТС. Учитывая относительно небольшую толщину ТС, наибольшее влияние магнитного поля ожидается в случае, когда панель ТС перпендикулярна к направлению вектора магнитного поля.

В качестве подставки для размещения ТС в центре испытательного объема ПЛ используется пенопластовая панель, которая практически не влияет на распределение напряженности электрического и магнитного полей, поскольку, относительные значения диэлектрической проницаемости и магнитной проницаемости материала близки к 1.

Последовательность установки ориентаций выбран из соображений уменьшения порога устойчивости ТС на основании экспертной оценки. Это важно для того, чтобы испытать максимально возможное число вариантов расположения ТС.

Программа испытаний включала такие этапы:

1 Испытания начинаются с подачи ЭМИ, напряженность электрического поля которого 5 кВ/м (10 % от номинала), полярность положительная. Начальная ориентация № 1. Далее, при этой напряженности испытываются последовательно ориентации № 2 и № 3. Для каждой ориентации подается по 2 импульса ЭМИ. После каждого воздействия проверяется качество функционирования. Поэтому, время между импульсами превышает 1 минуту.

2 Изменяется полярность подаваемого напряжения на отрицательную. Повторяется процедура по п.1.

3 В соответствии с требованиями стандарта [1], следующий уровень может быть установлен 25 кВ/м. Однако, учитывая особенности испытываемого ТС, увеличение напряженности электрического поля осу-

ществляется на 10 кВ/м, т.е. устанавливается напряженность 15 кВ/м, затем 25 кВ/м, 35 кВ/м и 50 кВ/м.

На каждом установленном уровне реализуется процедура по п. 1 и п. 2.



а) положение 1 – горизонтальное



б) положение 2 – на боку



в) положение 3 – вертикальное

Рисунок 14 – варианты размещения ТС при испытаниях

4 Качество функционирования ТС оценивается по факту показаний на дисплее после воздействия и способности выполнять вычислительные функции.

Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Критерии качества функционирования идентифицируются следующим образом:

А – показания на дисплее не изменились, способность выполнять вычислительные функции сохранена (штатный режим функционирования).

В – показания на дисплее изменились, но способность выполнять вычислительные функции сохранена (функционирование восстанавливается без участия оператора).

С – показания на дисплее изменились, способность выполнять вычислительные функции утрачена (сбой режима функционирования, который устраняется оператором путем перезагрузки).

Д – дисплей потух, полный отказ работоспособности.

При значении напряженности электрического поля 35,2 кВ/м калькулятор утратил работоспособность, вследствие деградации контролера. На основании результатов можно сделать предположение о преимущественном влиянии Н-поля, поскольку, корпус калькулятора выполнен из пластика и не обеспечивает

достаточного уровня ослабления магнитной составляющей ЭМИ, а гальванические связи контролера обрывают замкнутую петлю.

Таблица 3 – Результаты испытаний устойчивости калькулятора

Напряженность E -поля	Полярность	Ориентация ТС	Номер испытания	Критерий функционирования
5,1 кВ/м	плюс	1	1.1	A
	плюс	1	1.2	A
	плюс	2	1.3	A
	плюс	2	1.4	A
	плюс	3	1.5	A
	плюс	3	1.6	A
	минус	1	1.7	A
	минус	1	1.8	A
	минус	2	1.9	A
	минус	2	1.10	A
17,7 кВ/м	плюс	2	1.11	A
	плюс	3	1.12	A
	плюс	1	2.1	A
	плюс	1	2.2	A
	плюс	2	2.3	B
	плюс	2	2.4	B
	плюс	3	2.5	B
	плюс	3	2.6	B
	минус	1	2.7	A
	минус	1	2.8	A
26,4 кВ/м	минус	2	2.9	B
	минус	2	2.10	B
	минус	3	2.11	B
	минус	3	2.12	B
	плюс	1	3.1	A
	плюс	1	3.2	A
	плюс	2	3.3	B
	плюс	2	3.4	B
	плюс	3	3.5	B
	плюс	3	3.6	B
35,2 кВ/м	минус	1	3.7	A
	минус	1	3.8	A
	минус	2	3.9	B
	минус	2	3.10	B
	минус	3	3.11	B
	минус	3	3.12	B
	плюс	1	4.1	B
	плюс	1	4.2	B
	плюс	2	4.3	C
	плюс	2	4.4	C
плюс	3	4.5	D	

7 Общие тенденции зависимости уровня устойчивости ТС

В стандарте [7] обобщены результаты многочисленных исследований влияния на уровень устойчивости ТС параметров воздействующих электромагнитных излучений. В разделе А.3 стандарта [7] описано влияние ширины импульса. Электронное оборудование обычно реагирует либо на пиковую мощность, либо на среднюю мощность воздействующего электромагнитного излучения, связанную с длительностью импульса. На основании многочисленных данных для определения взаимосвязи между пиковыми и средними эффектами установлена закономерность, приведенная на рис. 15 (рис. А.4 [7]).

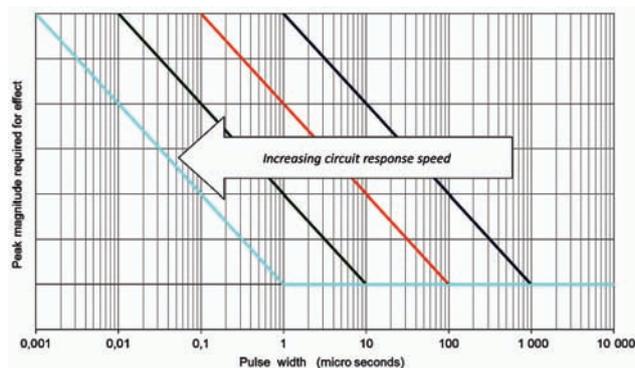


Рисунок 15 – Зависимость отказов от ширины импульса [7]

На рис. 15 показано, как пиковая мощность для отказа типичной схемы будет уменьшаться по мере увеличения ширины импульса, что соответствует средней мощности воздействующего электромагнитного излучения. В точке перехода схема больше не реагирует на возрастающую среднюю мощность и, по видимому, зависит только от пиковой мощности, соответствующей режиму пиковой мощности. Для многих систем существует зависимость от ширины импульса и требуемой пиковой мощности.

Обобщенная информация о пиковой мощности и энергии непрерывных и импульсных микроволновых, узкополосных и широкополосных источников, представлена на рис. 16 [7].

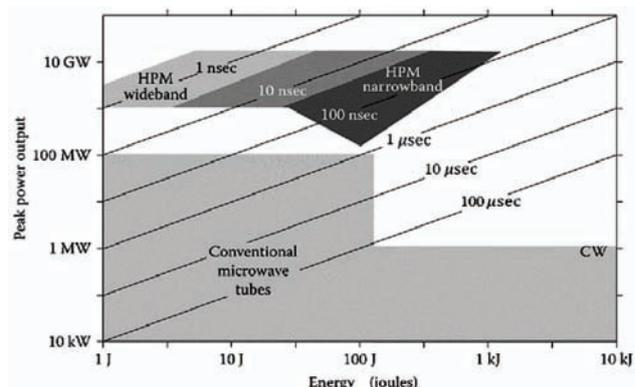


Рисунок 16 – Пиковая мощность и энергия непрерывных и импульсных микроволновых источников, узкополосных и широкополосных источников [7]

Следует отметить, что испытания устойчивости ТС к действию ЭМИ ЯВ для техники гражданского применения до сих пор широко не проводятся.

Выводы

В качестве примера практической реализации требований процедуры RS105 стандарта MIL-STD-461G [1], представлены результаты испытаний устойчивости электронного калькулятора.

Испытания проведены с использованием технического обеспечения Эталона единиц сильных импульсных электрических и магнитных полей (Эталон РЭМП). Для этого, дополнительно, был изготовлен генератор ЭМИ, обеспечивающий заданные амплитудно-временные параметры импульса, включенный в систему Эталона РЭМП вместо генератора экспонен-

ціальних імпульсов (ГЭИ).

Результаты испытаний показали, что уже при напряженности электрического поля ЭМИ, равной 17,7 кВ/м проявляется эффект обнуления информации на экране калькулятора, но работоспособность его сохраняется. При напряженности электрического поля 35,2 кВ/м произошло нарушение работоспособности калькулятора (погас экран, без возможности восстановить работоспособность путем операции «выключить-включить»). Анализ показал, что отказ обусловлен деградацией контролера.

Список литературы:

1. MIL-STD-461G:2011 Department of defense interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.
2. *Nemchenko Yu.* The development of the pulse electromagnetic processes measurement unity supporting system in Ukraine / *Yu. Nemchenko, V. Knyazyev, V. Kravchenko, I. Lisnoy* // *Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, 18-22 September, 2006, Sevastopol, Ukraine.
3. *Кравченко В.И.* Электромагнитный терроризм / *В.И. Кравченко*. – Х.: Изд-во «НТМТ», 2011. – 392 с.
4. *Гуревич В.И.* Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса / *В.И. Гуревич*. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 302 с.
5. *Sakharov K.Yu.* A picosecond pulsed electric field Strength measuring transducer / *K.Yu. Sakharov, V.A. Turkin, O.V. Mikheev, M.I. Dobrotvorskii, A.V. Sukhov* // *Measurement Techniques*. – Vol. 57, No. 2, May, 2014. – P. 201-205.
6. *Dolmatov T.V.* A superbroadband electro-optical pulsed Electric field strength converter/ *T.V. Dolmatov, V.V. Bukin,*

K.Yu. Sakharov, A.V. Sukhov, S.V. Garnov, V.A. Terekhin // *Measurement Techniques*. – Vol. 57, No. 10, January, 2015. – P. 1179-1183.

7. IEC 61000-4-36:2014 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-36: Testing and measurement techniques – IEMI immunity test methods for equipment and systems.

Bibliography (transliterated):

1. MIL-STD-461G:2011 Department of defense interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.
2. *Nemchenko Yu., Knyazyev V., Kravchenko V., Lisnoy I.* The development of the pulse electromagnetic processes measurement unity supporting system in Ukraine. *Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, 18-22 September, 2006, Sevastopol, Ukraine.
3. *Kravchenko V.I.* *Jelektromagnitnyj terrorizm*. Kharkiv: Izd-vo NTMT, 2011. 392 p.
4. *Gurevich V.I.* *Zaschita oborudovaniya podstanciy ot elektromagnitnogo impulsa*. Moscow: Infra-Ingeneriya, 2016. 302 p.
5. *Sakharov K.Yu., Turkin V.A., Mikheev O.V., Dobrotvorskii M.I., Sukhov A.V.* A picosecond pulsed electric field Strength measuring transducer. *Measurement Techniques*, Vol. 57, No. 2, May, 2014, P. 201-205
6. *Dolmatov T.V., Bukin V.V., Sakharov K.Yu., Sukhov K.Yu., Garnov S.V., Terekhin V.A.* A superbroadband electro-optical pulsed Electric field strength converter. *Measurement Techniques* Vol. 57, No. 10, January, 2015. P. 1179-1183.
7. IEC 61000-4-36:2014 Electromagnetic compatibility (EMC) –Part 4-36: Testing and measurement techniques – IEMI immunity test methods for equipment and systems.

Поступила (received) 20.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Випробування стійкості калькулятора до впливу ЕМІ наносекундного діапазону / В.В. Князєв, В.М. Іванов, А.І. Танцур // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 10-17. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Испытания устойчивости калькулятора к воздействию ЭМИ наносекундного диапазона / В.В. Князев, В.М. Иванов, А.И. Танцур // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 10-17. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

A practical example of determination of immunity of equipment to action of EMP of nanosecond range / V.V. Kniaziev, V.M. Ivanov, A.I. Tancura // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 10-17. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Князєв Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", тел./факс: (057) 707-68-68, e-mail: knyaz2@i.ua.

Князєв Володимир Владимирович - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ", тел./факс: (057) 707-68-68, e-mail: knyaz2@i.ua.

Kniaziev Volodymyr Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior staff scientist, Principal scientist, NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", Phone/Fax: (057) 707-68-68, e-mail: knyaz2@i.ua.

Іванов Володимир Михайлович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", тел./факс: (057) 707-68-68, e-mail: ivo@ukr.net.

Иванов Владимир Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ", тел./факс: (057) 707-68-68, e-mail: ivo@ukr.net.

Іванов Володимир Мухайлович – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), senior staff scientist, NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", Phone/Fax: (057) 707-68-68, e-mail: ivo@ukr.net.

Танцур Олександр Іванович – провідний інженер, НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", тел./факс: (057) 707-68-68.

Танцур Александр Иванович – ведущий инженер, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ", тел./факс: (057) 707-68-68.

Tancura Oleksandr Ivanovych – Leading engineer, NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", Phone/Fax: (057) 707-68-68.

УДК 621.317.3

В.В. КНЯЗЕВ, С.И. МЕЛЬНИК, С.П. ШАЛАМОВ**МЕТОДИКА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА В ПОЛЕОБРАЗУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ПОЛОСКОВОГО ТИПА**

У статті представлена методика моделювання у середовищі COMSOL процесів поширення ЕМІ в полозковій системі відкритого типу, яка може бути застосована для будь-якого варіанту полозкової системи. Результати моделювання показали, що вимоги стандарту MIL STD 461G за ступенем однорідності поля 6 дБ, легко задовольняються будь-якою системою полеутворення за використання полозкової лінії. Розглянута полеутворююча система традиційного типу з перехідними секціями та горизонтальною центральною частиною.

Ключові слова: числове моделювання, електромагнітний імпульс, полеобразующая система, полозкова лінія, зона однорідності.

В статье представлена методика моделирования в среде COMSOL процессов распространения ЭМИ в полосковой системе открытого типа, которая может быть применена для любого варианта полосковой системы. Результаты моделирования показали, что требования стандарта MIL STD 461G по степени однородности поля 6 дБ, легко удовлетворяются любой системой полеобразования использующей полосковые линии. Рассмотрена полеобразующая система традиционного типа с переходными секциями и горизонтальной центральной частью.

Ключевые слова: численное моделирование, электромагнитный импульс, полеобразующая система, полосковая линия, зона однородности.

Method of simulation in COMSOL environment of the processes of propagation of EMP in stripline system of open type that can be used for any variant of stripline system is presented in the paper. The results of simulation showed that the requirements of the standard MIL-STD-461G on the degree of field uniformity of 6 dB are easily satisfied by any field-forming system with strip lines. It was shown that, to surely obtain a pulse front of 2 10⁻⁹ s and required amplitude, it is advantageous to raise the lower plate of the strip line field-forming system through a height 1 m above the surface of the ground. The field-forming system of the traditional type with transitional sections and horizontal central part is considered. The dimensions of the horizontal part are: the distance between the planes – 3 m, the length – 5 m. In the area of working volume of the field-forming system, vectors of electric and magnetic field strength deflect from the plane of cross section through no more than 0.3 rad at the edges and no more than 0.05 rad in its centre. The waveform deviates from the wave of TEM-type through no more than 5% in the central area about 3 m in length and at the distance from the current-conducting elements no less than 0.3 m. When pulse front goes through the horizontal part of the field-forming system, the uniformity of distribution of electric field (Ez component) and magnetic field (Hy component) is no more than ±30% of the average value which equals ±1 dB.

For the central part 2x2m² (which is more than half of the horizontal part by width and height of FS), field nonuniformity is no more than ±15% which is ±0.6 dB. In the central cross section of the horizontal area, the nonuniformity is still lower and does not exceed ±0.3 dB in the square 2x2m².

Key words: numerical simulation, electromagnetic pulse, field-forming system, strip line, zone of uniformity.

Введение. Актуальность рассмотрения вопросов, связанных с методологией проведения испытаний уровня устойчивости технических средств, которые содержат в своей основе электронные, радиоэлектронные и электрические компоненты, обуславливается рядом объективных обстоятельств. С одной стороны, активное расширение сферы применения указанных компонент; снижение уровня устойчивости электронных компонент в результате использования слаботочной элементной базы, все более ответственные функции, которые возлагаются на эти компоненты (управления, принятия решений и т.п.). С другой стороны, уровень электромагнитного «загрязнения» окружающего пространства неуклонно возрастает. Причем, к естественным источникам мощных электромагнитных помех, например, вызываемых молниевыми разрядами, с определенной вероятностью, могут добавиться источники искусственного происхождения. К числу таких источников относится электромагнитный импульс ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ) [1–10].

В связи с большой зоной распространения ЭМИ

высотного ЯВ (до 10⁶ км²), его воздействию могут подвергнуться практически все объекты инфраструктуры находящиеся в зоне облучения. Поэтому, негативные последствия возможны и в тех странах, которые непосредственно не участвуют в конфликте. Учитывая это обстоятельство, Международная электротехническая комиссия (МЭК) разработала серию стандартов, описывающих процессы формирования ЭМИ ЯВ, значения вероятных параметров, требования по устойчивости к действию ЭМИ высотного ЯВ объектов гражданской инфраструктуры и методы испытаний.

Для создания испытательных импульсов в качестве полеобразующих систем, как правило, используются полосковые линии. Что обуславливает актуальность анализа структуры импульсных электромагнитных полей и процесса их распространения в полосковых линиях методами математического моделирования. В рамках данной статьи описана реализация расчетной оценки с использованием Comsol Multiphysics 5.3.

1 Постановка задачи

Провести численное моделирование прохождения импульсной электромагнитной волны по полеобразующей системе (ПС). В качестве ПС использовать полосковую несимметричную линию с переходными секциями и горизонтальной частью. Провести исследования следующих аспектов:

- расчет входного импеданса ПС;
- расчет волнового сопротивления ПС в различных сечениях;
- оптимизация параметров согласующей нагрузки ПС;
- расчет пространственного распределения напряженности поля в ПС;
- расчет зоны однородности, удовлетворяющей условию +6 дБ.

Дополнительно исследовать влияние расстояния до «грунта» на распределение поля и динамику прохождения электромагнитного импульса в ПС. Также, оценить размер зоны распространения волны во внешнее пространство (для напряженностей от 10 В/м до 320 В/м).

Описание математической модели. Описание выбора расчетного метода и принятых приближений

Система уравнений

Для моделирования распространения импульса используется интерфейс *Electromagnetic Waves, Transient (temw)*. Такой выбор является типичным для решения задач распространения электромагнитных импульсов, так как учитывает временные зависимости полей, не являющихся гармоническими. В исследуемой пространственно-временной области находятся значения магнитного векторного потенциала \vec{A} путем решения уравнения Максвелла:

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times A) + \mu_0 \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial A}{\partial t} \right) = 0,$$

где A – магнитный векторный потенциал;

σ – электрическая проводимость;

ϵ_0 – электрическая постоянная;

ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость;

μ_0 – магнитная постоянная;

μ_r – относительная магнитная проницаемость.

Настраиваемые параметры модуля *WaveEquation, Electric*:

Температура окружающей среды 293.15К.

Давление 1 атм.

Поле электрического смещения вычисляется с учетом свойств материала: относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r .

Магнитная индукция вычисляется с учетом свойств материала: относительной магнитной проницаемости μ_r ; $B = \mu_0 \mu_r H$.

Начальные условия для вектора магнитного потенциала – нулевое значение и нулевая первая производная по времени: $A = 0$, $\frac{\partial A}{\partial t} = 0$.

Граничные условия

В элементах, заданных как идеальный проводник, граничные условия устанавливают нулевую тангенциальную составляющую электрического поля: $n \times E = 0$ (n – вектор нормали к поверхности элемента).

Для улучшения точности учета рассеяния остаточной части импульса в пространство в модели задана виртуальная сфера радиуса 17 м (т.е. на расстоянии, на порядок большем характерных пространственных размеров импульса и ПС), на поверхности которой введены условия поглощения поля:

$$\begin{aligned} \mu_0 n \times H + \frac{\mu_0}{Z_c} n \times (E \times n) - \frac{r}{\mu_r} n \times (A \times n) = \\ = \frac{\mu_0}{Z_c} n \times (E_0 \times (n - k_{dir})) - \frac{\gamma}{\mu_r} n \times (A_0 \times (n - k_{dir})) - \\ - \frac{r}{\mu_r} n \times (A_0 \times n). \end{aligned}$$

$$E_0 = -\frac{\partial A_0}{\partial t} Z_c = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \gamma = \frac{\sigma Z_c}{2}.$$

Моделирование источника поля и нагрузки

В том случае, когда источником поля является генератор напряжения, а также в случае ТЕМ-волны, в пакете моделирования COMSOL (RF) предусмотрен инструмент «Lumpedport» (сосредоточенный порт). Он позволяет описывать его, как элемент линии передачи и подключать к нему любые электротехнические схемы. Сосредоточенный порт должен быть задан между двумя металлическими поверхностями, расстояние между которыми значительно меньше значения длины волны, что позволяет использовать локально квазистатическое приближение.

В рассматриваемой задаче с импульсным источником напряжения можно говорить лишь о характерном значении длины волны, ориентируясь на время достижения максимума в импульсе. Оно оказывается одного порядка с размером порта. Но анализ пространственно-временного распределения напряженности электрического поля в различных сечениях ПС (см. далее) показал, что локально квазистатическое приближение допустимо и в этом случае.

Сосредоточенный входной порт характеризуется импедансом Z_{port} и S-параметром S_{11} , которые вычисляются по формулам:

$$Z_{port} = \frac{V_{port}}{I_{port}}, \quad S_{11} = \frac{V_{port} - V_{in}}{V_{in}},$$

где входное напряжение V_{in} порта задано аналитически, в соответствии с формой импульса, заданного в ТЗ:

$$V_{in}(t) = V_0 \operatorname{Im} p(t),$$

где $\operatorname{Im} p(t) = k_1 (e^{-a_1 t} - e^{-b_1 t})$.

Значения параметров импульса заданы в разделе *GlobalDefinitions*:

$$V_0 = 0.1 \text{ MB}; k_1 = 1.3; a_1 = 4 \times 10^7 \text{ c}^{-1}; b_1 = 6 \times 10^8 \text{ c}^{-1}.$$

Характеристический импеданс порта задан постоянным и равным $Z_{ref} = 50 \Omega$. V_{port} – напряжение на порту, задаваемое линейным интегралом от напряженности электрического поля между его контактами, Для двумерной модели получаем соотношение.

$$V = \int_h E \cdot dl = \int_h (E \cdot a_h) dl. \quad (1)$$

Ток I_{port} задается, как суммарный ток, равный усредненному значению суммарного тока по всем сечениям, параллельным контактным площадкам порта.

$$I = \int_{\omega} (n \times J_s) dl = - \int_{\omega} (J_s \cdot a_h) dl. \quad (2)$$

Для моделирования **нагрузки**, подавляющей отражение импульса от противоположной источнику грани ПС, установлен **LumpedElement**, состояние которого определяется постоянным импедансом:

$$Z = \frac{V_I}{I_I}. \text{ Тип элемента: однородный.}$$

Характеристический импеданс нагрузки был подобран из условия минимизации мощности отраженного импульса, о установлен равным $Z_{element} = 125 \Omega$.

Временной интервал счета задачи варьируется от $[0,5 \times 10^{-10} \dots 1.5 \times 10^{-7}]$ с до $[0,5 \times 10^{-10} \dots 2 \times 10^{-6}]$ с.

Выбор режимов моделирования в программе

Выбор решателя для данной задачи не играет решающей роли, так как все они: PARDISO, MUMPS и SPOOLES, принадлежат к классу прямых решателей (DirectSolvers), и должны приводить к одному и тому же решению.

С расчетной точки зрения эти варианты различаются только скоростью выполнения, которая, как правило, выше у PARDISO. Из этих соображений и был выбран именно этот решатель.

Ниже приводятся значения параметров, входящих в настройки метода решения задачи. Большинство из них не оказывают принципиального влияния на качество полученных результатов, и выбирались из соображений максимальной точности решения при приемлемом (при имеющихся в наличии вычислительных ресурсах) времени счета. Некоторые из значений параметров установлены «по умолчанию», или определены системой автоматически. Другие регулировались в соответствии с вышеописанными критериями. В списке параметры сгруппированы по разделам.

Time-Dependent Solver: раздел Absolute Tolerance

Эти параметры задают уровень допустимой ошибки на каждом шаге решения. Решатель уменьшает временной шаг до тех пор, пока не будет соблюдаться требуемое условие ошибки счета. Упрощенно это условие можно представить следующей схематичной формулой:

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{|E|}{A + R|Y|} \right)^2} < 1,$$

где суммирование производится по всем степеням

свободы, E – оценка ошибки, Y – зависимая переменная, R – относительная погрешность, A – нормируемая абсолютная погрешность. Такой выбор формы оценки допустимой погрешности обеспечивает как хорошую оценку точности решения в основной пространственно-временной области решения, так и критерий допустимой точности для областей, где поле приближается к нулевому. Выбор такой схемы задается следующими параметрами:

Global Method: *Scaled*

Tolerance method: *Factor*

Tolerance Factor: *0.1*

Method: *Use Global*

Update Scaled Absolute Tolerance: *Yes*

Time-Dependent Solver: Раздел Time Stepping

В этом разделе задается метод счета по дискретным временным шагам. Метод BDF известен как довольно устойчивый для такого типа задач, но может вызывать ошибки, связанные с отбрасыванием высоких частот в решении, даже в тех случаях, когда их наличие явно следует из начальных условий. Поскольку в моделируемой задаче как раз высокие частоты играют основную роль, мы используем здесь более адаптивный алгоритм Generalizedalpha, который обладает характеристиками, схожими с BDF, но позволяет регулировать уровень учета высоких частот. Для выбранного метода заданы следующие параметры:

Method: *Generalized alpha*

Steps Taken by Solver: *Free*

Amplification for high frequency: *0.75*

Predictor: *Linear*

Time-Dependent Solver: Раздел Algebraic variable settings

Singularmassmatrix: *Maybe*– решатель допускает возможность и проверяет нулевые столбцы и строки в матрицах.

Consistent initialization: *Backward Euler*

Fraction of initial step for Backward Euler: *0.001*

Errorestimation: *IncludeAlgebraic*

Включена последовательная инициализация дифференциально-алгебраических систем методом BackwardEuler. Для этого решатель выполняет небольшой искусственный шаг в обратном направлении. Размер шага задан достаточно малым – 0,001 от базового. Параметр IncludeAlgebraic включает алгебраические степени свободы в формулу оценки ошибки временной дискретизации.

Остальные, менее критичные параметры настроек приведены списком ниже:

Suggested Direct Solver (temw): General

Solver: *PARDISO*

Preordering Algorithm: *Nested dissection multithreaded*

Scheduling method: *Auto*

Row Preordering: *Yes*

Bunch-Kaufman pivoting: *No*

Multithread forward and backward solve: *Yes*

Pivotingperturbation: 10^{-8} (Этот параметр входит в один из алгоритмов вариационного поиска опорных элементов несимметричных матриц решателем

PARDISO).

Parallel direct sparse for clusters: *Yes*
 Out-of-core: *Automatic*
 Memory fraction for Out-of-core: *0.99*
 In-core memory method: *Automatic*
 Minimum in-core memory: *512 Mb*
 Used fraction of total memory: *0.8*
 Internalmemoryusagefactor: *3*

Эта и предыдущие опции влияют на распределение оперативной и виртуальной памяти решателя. Их выбор зависит от имеющихся в наличии вычислительных ресурсов и требований к скорости счета.

Suggested Direct Solver (temw): Error

Check error estimate: *Automatic* (Автоматическая проверка уровня ошибок в процессе решения).

Factor in error estimate: *400*
 Iterative refinement: *Yes*
 Maximum number of refinement: *15*
 Use in nonlinear solver: *No*

Suggested Direct Solver (temw): Advanced: General

Matrix symmetry: *Automatic*
 Matrix Format: *Automatic*
 Row equilibration: *Yes*
 Null-space function: *Automatic*
 Orthonormal block limit: *10⁷*
 Store last residual: *Off*

Suggested Direct Solver (temw): Fully Coupled 1: Method and termination

Nonlinear method: *Constant(Newton)*
 Damping factor: *1*
 Jacobian update: *Minimal*
 Termination technique: *Tolerance*
 Maximum number of iterations: *4*
 Tolerance factor: *1*
 Stabilization and acceleration: *None*

Solver Configuration: Solution1: Dependent variables 1

Magnetic vector potential Scaling method: *From Parent*

Incident Magnetic vector potential Scaling method: *From Parent/*

2 Иллюстрация наложения расчетной пространственной сетки

Выбор параметров конечно-элементного разбиения определяется как физическими параметрами задачи, так и требованиями к точности и скорости счета. В пакете моделирования COMSOL предусмотрен режим автоматического выбора размеров ячеек разбиения в различных областях системы, в зависимости от их геометрических размеров и параметров электромагнитного импульса.

Метод конечных элементов аппроксимирует решение внутри каждого элемента, используя некоторую элементарную функцию формы, которая может быть постоянной, линейной или более высокого порядка. В зависимости от порядка функции элементов в модели для решения задачи требуется более тонкая или грубая сетка.

В общем, можно выделить три проблемных фак-

тора, которые определяют необходимое разрешение сетки:

– первый – это неоправданно большое количество элементов из-за геометрических особенностей модели. Генератор сетки автоматически создает более мелкую сетку, где есть много мелких геометрических деталей. Для борьбы с этим фактором требуется вручную удалить (или упростить форму) мелких геометрических деталей системы, если только это не оказывает существенного влияния на распределение поля.

– второй – это влияние скин-эффекта на распределение поля в силу возникающих потерь мощности. Глубина скин-слоя может быть легко оценена в зависимости от проводимости, проницаемости материала и частоты. Для учета захвата изменения полей необходимо создать, по крайней мере, два линейных элемента на глубину скин-слоя. Если глубина скин-слоя неизвестна, или в задаче не требуется точного расчета профиля диссипации энергии, необходимо заменить области с небольшой глубиной скин-слоя соответствующим граничным условием. Тем самым удается избежать не нужного увеличения количества расчетных элементов сетки.

– третий и последний фактор – длина волны. Чтобы правильно решить задачу, необходимо использовать около 10 линейных элементов (или пяти элементов 2-го порядка) на длину волны. При этом необходимо учитывать, что длина волны зависит от свойств материала.

С учетом этих требований при решении задачи использовались как грубые, так и более точные разбиения ПС на конечные элементы. В первом случае проводилась грубая оптимизация и получение начальных приближений, так как эти процедуры требуют многократного пересчета модели при различных параметрах. Окончательный расчет для получения максимально точных решений производился на сетке с мелкими элементами. Их размер подбирался вручную (с учетом приведенных выше требований) таким образом, чтобы дальнейшее умельчение сетки уже не оказывало существенного влияния на результаты счета.

2.1 Выбор «минимальной» расчетной сетки для предварительного анализа и оптимизации модели

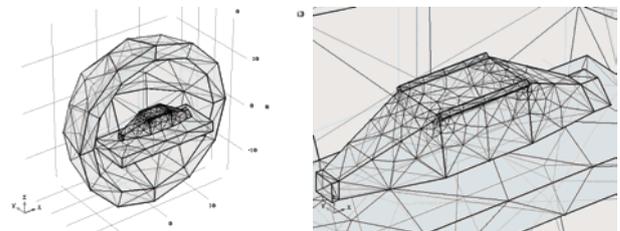


Рисунок 1 – Грубая сетка для проведения предварительных исследований ПС и ее оптимизации. Время одного расчета на компьютере с ОП 16 Гб около 10 минут

2.2 Выбор оптимальной расчетной сетки и ее оптимизации для получения требуемой точности

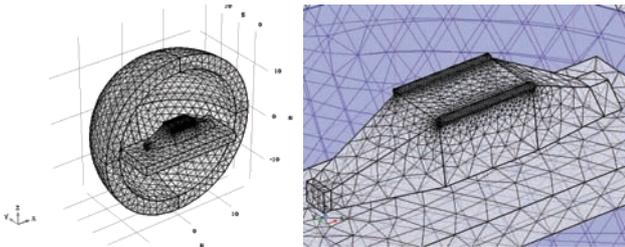


Рисунок 2 – Детализированная сетка для окончательных расчетов распределения поля в ПС. Время одного расчета на компьютере с ОП 16 Гб около 2 часов

2.3 Выбор сетки для анализа распределения поля во внешней по отношению к ПС области пространства

Для анализа распределения поля во внешней по отношению к ПС области пространства была использована модель с существенно большей областью, окружающей ПС. Для этого была построена другая сетка, в которой особенности ПС заданы более грубо, а окружающего ее пространства – более точно.

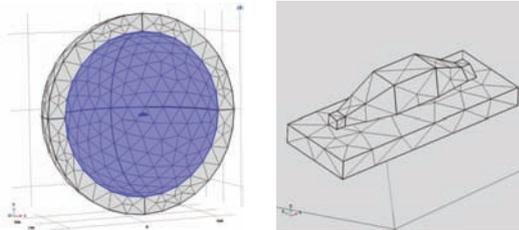


Рис. 3 – Расчетная сетка для анализа распределения поля во внешней по отношению к ПС области пространства

2.4 Выбор сетки для анализа влияния конструкции ввода на распределение поля в ПС

Дополнительно было проанализировано влияние особенностей системы подачи импульса в ПС. Оказалось, что при замене точной конструкции входа моделью сосредоточенного порта распределение поля в расчетной области ПС не претерпевает существенных изменений. В дальнейших расчетах поля была использована упрощенная модель с входом в виде сосредоточенного порта.

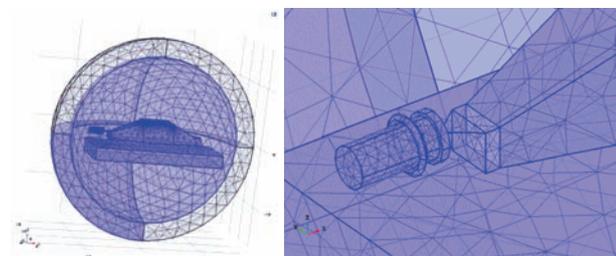


Рисунок 4 – Расчетная сетка для анализа влияния конструкции ввода на распределение поля в ПС

3 Анализ волнового сопротивления и входного импеданса ПС во временной области

Волновое сопротивление – это сопротивление, которое встречает электромагнитная волна при распространении вдоль однородной линии без отражения, т. е. при условии, что на процесс передачи не

влияют несогласованности на концах линии. Оно свойственно данному типу линии и зависит лишь от ее первичных параметров и частоты передаваемого тока. Электромагнитную волну можно представить в виде двух волн: волны напряжения, соответствующей электрической энергии, и волны тока, соответствующей магнитной энергии. Количественное соотношение, имеющее место между волной напряжения и волной тока в линии, и есть волновое сопротивление цепи. При этом, как следует из данного выше определения волнового сопротивления, необходимо рассматривать лишь падающую (движущуюся вперед) электромагнитную волну. Если в линии выделить отдельно отраженную волну, то она, двигаясь к началу линии, также будет встречать сопротивление, равное волновому сопротивлению. В общем виде волновое сопротивление является комплексной величиной.

Рассматриваемая нами ПС является неоднородной линией передачи. В неоднородной линии отраженные волны искажают частотную характеристику собственного волнового сопротивления. Подключенный к ее входу измерительный прибор покажет уже не волновое, а входное сопротивление, характеризующее новое электрическое состояние линии. Затухание неоднородной линии представляет собой суммарную величину, включающую, кроме собственного затухания кабеля также затухание за счет неоднородности электрических характеристик цепи.

Реальную линию можно рассматривать как неоднородную линию, составленную из отдельных однородных участков. Электромагнитная волна, распространяясь по такому кабелю и встречая на своем пути неоднородность, частично отражается от нее и возвращается к началу линии. При наличии нескольких неоднородных участков волна претерпевает серию частичных отражений и, циркулируя по линии, вызывает дополнительное затухание и искажение характеристик цепи.

Неоднородности в линии приводят к появлению в цепи двух дополнительных потоков энергии:

- Обратного потока, состоящего из суммы элементарных отраженных волн в местах неоднородностей и движущегося к началу цепи,
- Попутного потока, возникающего по закону двойных отражений вследствие того, что первоначально отраженные волны, движущиеся к началу цепи, встречая места неоднородностей, частично отражаются и направляются к концу линии.

Обратный поток приводит к колебаниям входного сопротивления линии.

3.1 Методика расчета волнового сопротивления и входного импеданса ПС

Электродинамическое определение волнового сопротивления подразумевает расчет соотношения электрической и магнитной амплитуд ЭМ волны, распространяющейся вдоль линии передачи. Таким образом, в стандартном случае ВС относится к однородным свойствам линии (проводимость, емкость, индуктивность), отнесенным к единице длины.

К разрабатываемой полеобразующей системе та-

кое определение не может быть применено без изменений, по следующим причинам:

- подаваемый на вход сигнал не является гармонической волной, и не характеризуется какой-то определенной частотой.

- входной сигнал не имеет бесконечного по времени периодического характера, а наоборот – хорошо локализован во времени и пространстве.

- характерные размеры импульса сравнимы с размерами полеобразующей системы (метры и доли метра).

Из приведенных выше определений следует, что в реальной волноводной линии при подаче периодического сигнала мы всегда меряем входной импеданс, а не волновое сопротивление. Это связано с тем, что неоднородности или не согласованные по нагрузке края линии создают отраженную волну, которая интерферирует с прямой волной и искажает ее. Поэтому для экспериментального измерения или теоретического расчета волнового сопротивления необходимо, строго говоря, обеспечить или имитировать однородность рассматриваемого участка линии. Это можно сделать различными способами:

- аналитический расчет погонной емкости и индуктивности соответствующей однородной линии, с последующим вычислением импеданса однородной линии с такими параметрами;

- измерение параметров участка линии, рассматриваемого как четырехполюсник, и последующее вычисление импеданса для прямой волны;

- измерение в импульсном режиме, во временном промежутке, в котором отраженная волна не успевает исказить фронт прохождения прямой.

В рассматриваемой задаче подаваемый на вход импульс хорошо локализован по времени. Его полуширина соответствует расстоянию порядка 0.5м, что значительно меньше характерных размеров геометрических параметров однородного участка ПС (5м). Это делает предпочтительным анализ волнового сопротивления и входного импеданса во временной области. При этом полученное значение входного импеданса оказывается зависящим от времени. Выделяя в этой зависимости интервал, в котором присутствует только прямая волна, мы можем получить и эквивалентное значение волнового сопротивления в соответствующем сечении ПС.

3.2 Алгоритм расчета временной зависимости входного импеданса в различных сечениях ПС

При расчете входного импеданса в заданном сечении мы учитываем как прямую волну, так и все отраженные от неоднородностей ПС волны. Этим входной импеданс отличается от волнового сопротивления, рассчитанного в том же сечении, но только для прямой волны. В обоих случаях мы сводим расчет этих параметров ПС к эквивалентным параметрам линии передачи и рассчитываем их по формуле:

$$Z = \frac{V}{I}.$$

Для этого мы вводим дополнительно вместо рассматриваемого сечения проводящую поверхность, соединяющую проводящие полеобразующие поверхно-

сти ПС и считаем, что по ней проходит некоторый поверхностный ток. Этот ток мы задаем таким образом, чтобы обеспечить те же самые граничные условия, что и в рассматриваемом сечении исходной ПС. В силу теоремы единственности, поле, как справа, так и слева от рассматриваемого сечения будет таким же, как и в ПС без эквивалентной проводящей поверхности (рис. 5).

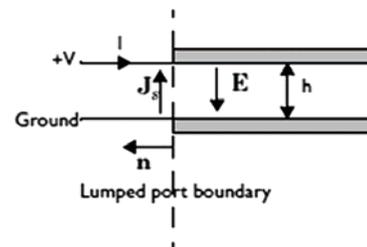


Рисунок 5 – Схема сосредоточенного порта и введения эквивалентных параметров тока и напряжения для расчета входного импеданса

Для обеспечения такого соответствия используем формулу граничного условия при заданной плотности поверхностного тока в бесконечно тонкой проводящей поверхности

$$-\vec{n} \times (H_1 - H_2) = J_s.$$

Заметим, что при моделировании поля в правой или левой от сечения области, эквивалентный магнитному полю ток должен идти в разных направлениях (на рисунке для правой области – снизу вверх, а для левой – сверху вниз). Таким образом, при объединении этих областей мы получаем два встречных и одинаковых по величине тока, которые компенсируют друг друга и возвращают нас к исходной задаче. Но если мы рассматриваем только правую или только левую часть (тем самым сводя задачу к задаче расчета входного импеданса передающей линии), то один из этих токов заменяет собой отброшенную часть ПС. Таким образом, зная распределение напряженности магнитного поля, мы можем рассчитать распределение эквивалентного поверхностного тока. По факту оно оказывается равным тангенциальной составляющей вектора магнитной напряженности. Далее, для получения полного тока, мы должны проинтегрировать эту плотность тока по ширине контактных линий (по координате Y в нашей модели), используя формулу (2).

Для расчета напряжения пользуемся формулой (1).

3.3 Анализ входного волнового сопротивления и импеданса ПС во временной области.

Ниже (рис. 6) приведены графики временных зависимостей напряжения, тока и входного импеданса *LumpedPort*, рассчитанные по приведенным выше формулам.

Предварительно было исследовано распределение характеристического (поверхностного) импеданса в центральном сечении ПС в различные моменты времени (через 5 нс), представленные на рис. 7.

На основании анализа результатов можно сделать вывод о том, что однородность распределения наблюдается на двух промежутках времени, соответствующих времени прохождения фронта волны через это сечение и по рупорной части ПС.

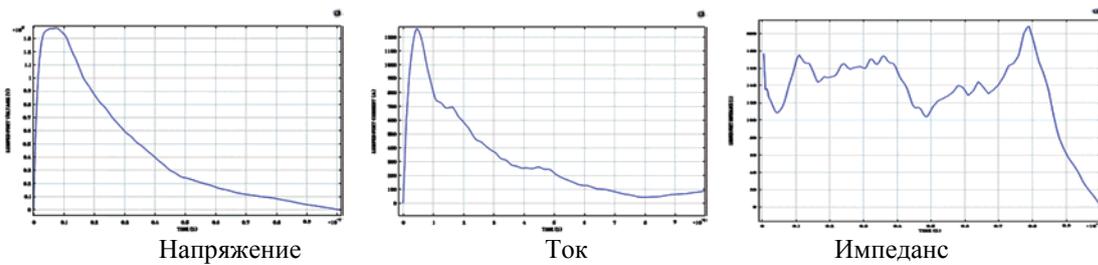


Рисунок 6 – Временные зависимости напряжения, тока и входного импеданса LumpedPort

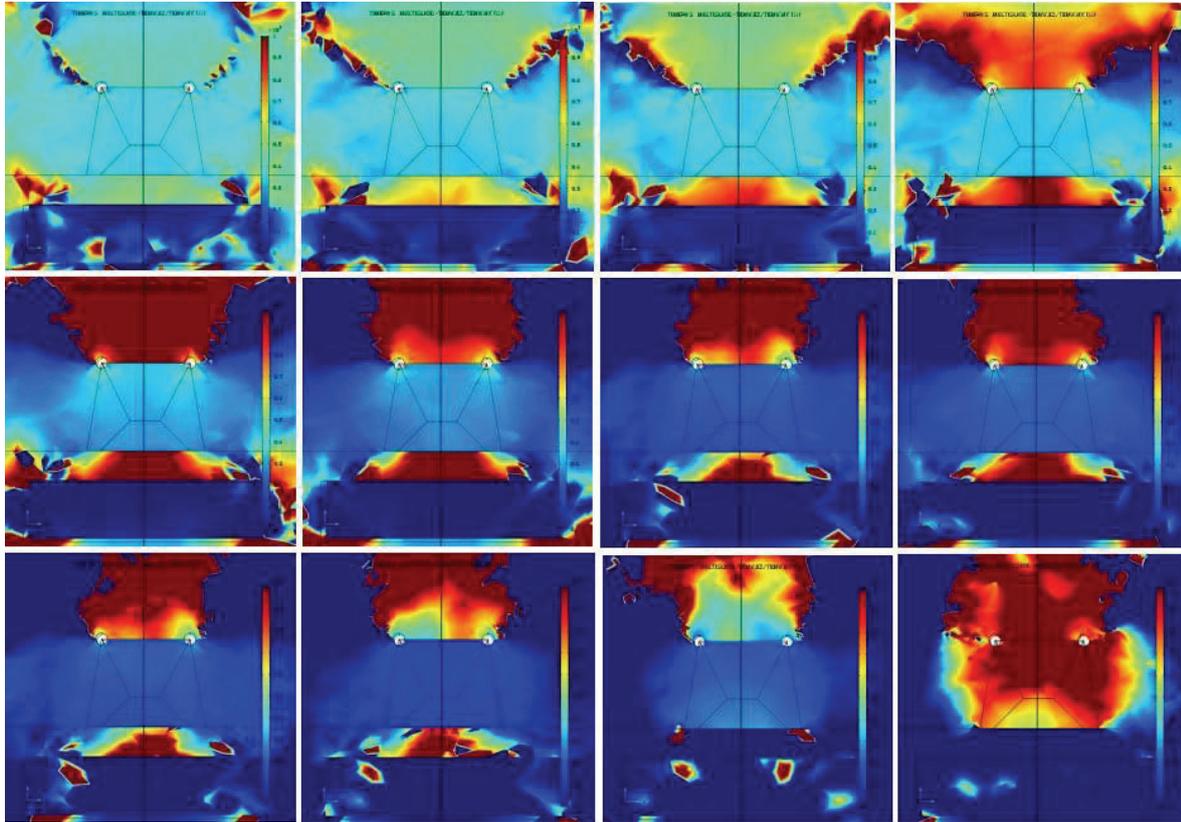


Рисунок 7 – Распределение характеристического (поверхностного) импеданса в центральном сечении ПС в различные моменты времени

Временные зависимости входного импеданса в центральном сечении ПС

На рис. 8 показана временная зависимость входного импеданса в центральном сечении ПС. Их анализ позволяет сделать следующие выводы:

- в сечении на расстоянии 5 м от входа фронт волны приходит в 18 нс. После этого значение импеданса составляет около 300 Ом, что полностью соответствует теоретическому значению волнового сопротивления, рассчитанному для прямоугольного волновода с отношением сторон $\frac{3}{4}$.

- начиная с момента 54 нс, к рассматриваемому сечению начинает приходить волна, отраженная от рупорной части ПС. При этом входное сопротивление все более отличается от волнового сопротивления в связи с тем, что все большая часть рупорной секции ПС задействована в формировании отраженной волны.

- начиная с момента 90 нс, к рассматриваемому сечению приходит волна, отраженная от нагрузки. В связи с возникающими переотражениями волны в выходной части ПС наблюдается большое количество плохо идентифицируемых резонансов.

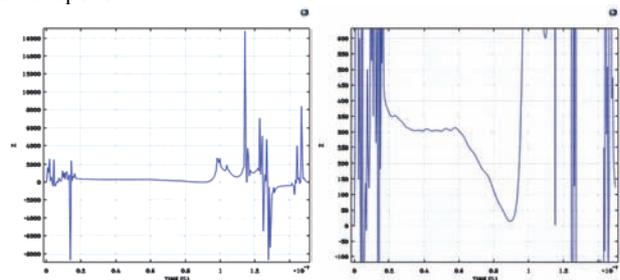


Рисунок 8 – Временная зависимость входного импеданса в центральном сечении ПС

На рис. 9 показана временная зависимость входного импеданса в сечении на расстоянии 10 м в центральном сечении ПС (переход прямой секции ПС в рупорную часть). Их анализ позволяет сделать следующие выводы:

- в сечении на расстоянии 10 м от входа фронт волны приходит в 36 нс;

- после этого значение импеданса линейно меняется от 360 Ом до 160 Ом. Этот участок соответствует постепенному включению рупорной части ПС в формирование отраженной волны.

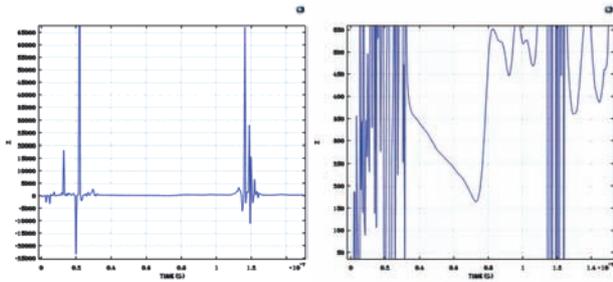


Рисунок 9 – Временная зависимость входного импеданса в сечении ПС на расстоянии 10 м от входа (переход в рупорную часть ПС)

Начиная с момента 72 нс, к рассматриваемому сечению начинает приходить волна, отраженная от нагрузки ПС. В промежутке времени 72–83 нс на графике входного импеданса отчетливо проявляются колебания волны, многократно переотраженные промежутком между плоскостями выхода.

4 Двумерные и трехмерные графики распределения напряженности электрического и магнитного полей в ПС

4.1 Методика представления результатов моделирования распределения напряженности электрического и магнитного полей в ПС

Целью создания и оптимизации полеобразующей системы является возможность генерации электромагнитного импульса, по своим пространственно-временным параметрам, максимально близкого заданному импульсу.

Поэтому, прежде всего, определим эти параметры и требования для «эталонного» импульса, при этом учтем, что он формируется в точке, достаточно удаленной от области измерений:

- соответствие ТЕМ – типу волны;
- однородность распределения в плоскости, перпендикулярной направлению излучения;
- отсутствие искажений в форме временного представления импульса в каждой точке исследуемого объема.

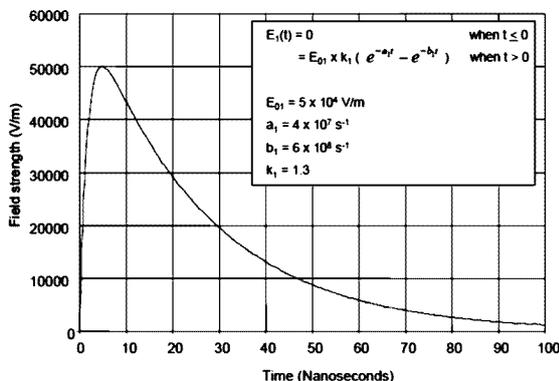


Рисунок 10 – Форма электромагнитного импульса

Временные параметры импульса представлены на рис. 10:

- длительность фронта (время нарастания от 0,1 до 0,9 в диапазоне 1,8 - 2,8 нс;
- длительность импульса на полуспаде

(23 ± 5) нс.

Методика представления результатов исследований представляет собой проверку и оценку степени соответствия модели каждому из этих приближений.

4.2 Общая картина распространения электромагнитного импульса в ПС

Прежде всего, проиллюстрируем общую картину распространения импульса в ПС. Для этого на рис. 11 представлены отдельные кадры динамического изменения распределения вертикальной составляющей (Z -составляющей) электрического поля в условиях согласованной нагрузки и заданной амплитуды импульса напряжения на входе.

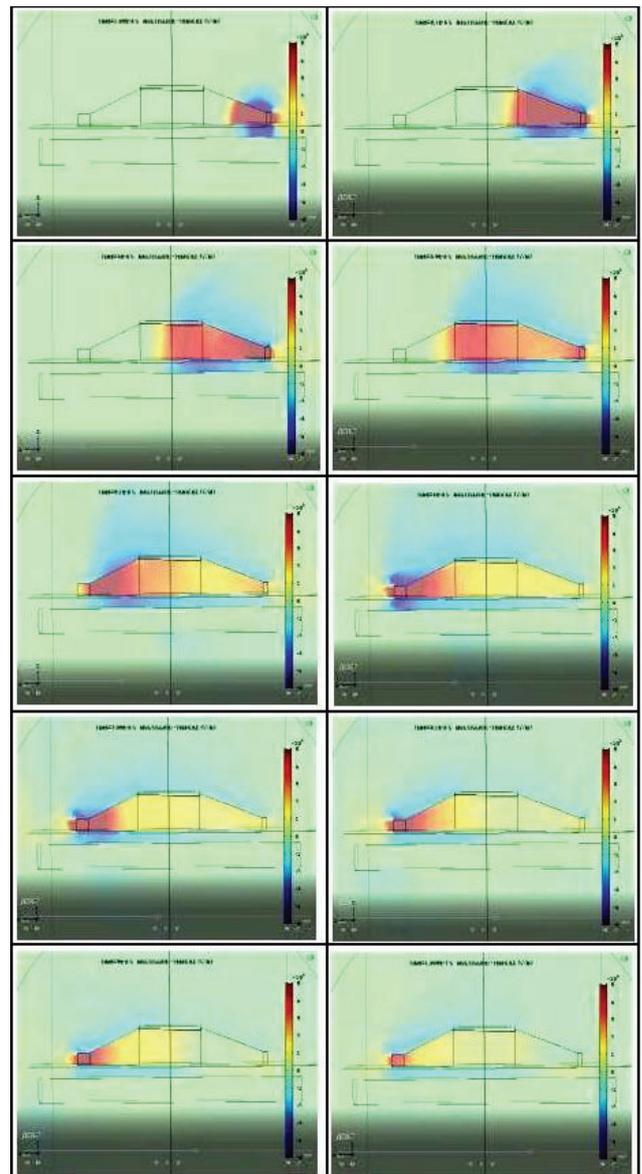


Рисунок 11 – Кадры динамического изменения распространения E_z импульса в ПС при согласованной нагрузке 125 Ом и максимальном входном напряжении 150 кВ

На отдельных кадрах рис. 12 показано распределение $E_z(x, z)$ в среднем продольном сечении ПС ($y = 0$) с интервалом 10 нс.

Предварительный анализ на основе представлен-

ных кадров показывает, что в горизонтальной области ПС поле распространяется без геометрических и временных искажений, достигая максимального значения напряженности 50 кВ/м. При этом в верхней части области фронт волны несколько отстает от фронта волны в нижней части, что связано с особенностями геометрии ПС.

4.3 Анализ соответствия волны типу TEM

В волне типа TEM отсутствуют составляющие электрического и магнитного полей в направлении распространения волны. Поэтому для проверки этого приближения были рассчитаны синусы углов наклона векторов поля к плоскости YZ , перпендикулярной направлению движения волны (вдоль оси X).

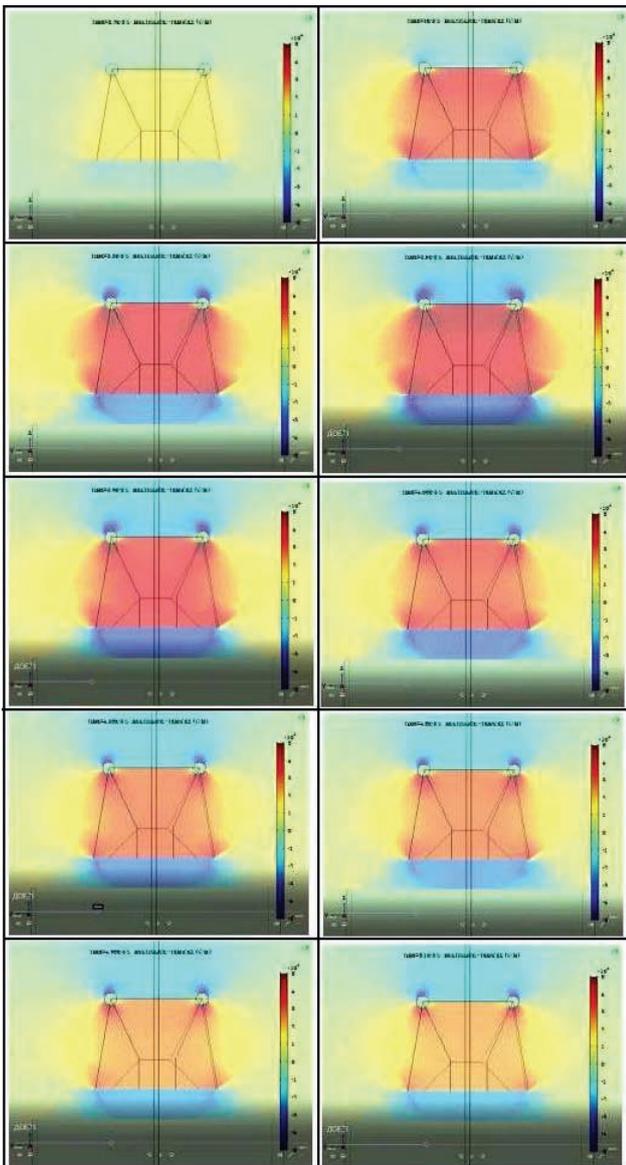


Рисунок 12 – Кадры динамического изменения распространения E_z импульса в ПС при согласованной нагрузке 125 Ом и максимальном входном напряжении 150 кВ. На отдельных кадрах показано распределение E_z в среднем поперечном сечении ПС ($x = 0$) с интервалом 2,5 нс (начиная с 25 нс после момента включения)

4.3.1 Полосковая несимметричная линия

Рассчитаны распределения, соответствующие трем сечениям YZ : на входе горизонтальной части ПС ($x = -L/2$), в ее центре ($x = 0$), и на выходе из нее ($x = L/2$). Схема расположения сечений представлена на рис. 13.

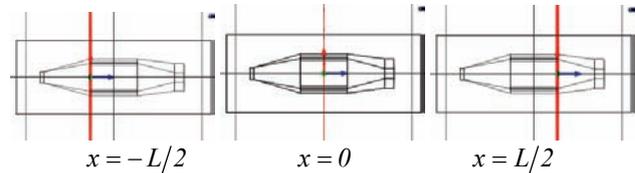


Рисунок 13 – Расположение сечений YZ для анализа соответствия волны TEM-типу (вид ПС сверху)

Для анализа выбран момент времени прохождения максимума импульса через соответствующее сечение. Результаты анализа показаны на рис. 14.

Из результатов расчета видно, что в прямой области ПС (исключая края токопроводящих элементов) вектор напряженности электрического поля отклоняется от сечения YZ не более, чем на 0,3 рад на краях горизонтальной области и не более, чем на 0,05 рад в ее центре.

Эффект отклонения на границах области можно объяснить тем, что на форму волны оказывают влияние конические части ПС, средняя линия которых и формирует направление движения волны под углом к горизонту.

Анализ структуры волны в остальных сечениях YZ горизонтального участка ПС, позволяет сделать вывод, что она отклоняется от волны TEM-типа не более, чем на 5% в центральной области длиной около 3 м и на расстоянии от токопроводящих элементов не менее 0,3 м.

4.3 Анализ однородности распределения поля в плоскости, перпендикулярной направлению излучения

4.3.1 Полосковая несимметричная линия с переходными секциями и горизонтальной частью

Анализ проводился в центральном поперечном сечении горизонтальной части ПС и на ее краях (рис. 13). На рис. 15 и 16 приведено распределение напряженности электрического (Z -компонента) и магнитного (Y -компонента) полей в указанных сечениях и, более подробно, в их центральной части размером 2 м на 2 м (отступ от верхней и нижней токопроводящих плоскостей одинаков и составляет 0,5 м). Для анализа был выбран момент времени прохождения максимума импульса через соответствующее сечение. Максимальное напряжения входного импульса 150 кВ.

На основании анализа полученных результатов сделаны следующие выводы:

При прохождении фронта импульса в горизонтальной части ПС неоднородность распределения электрического поля (компонента E_z) и магнитного (компонента H_y) не превышает $\pm 30\%$ от среднего значения, что составляет ± 1 дБ.

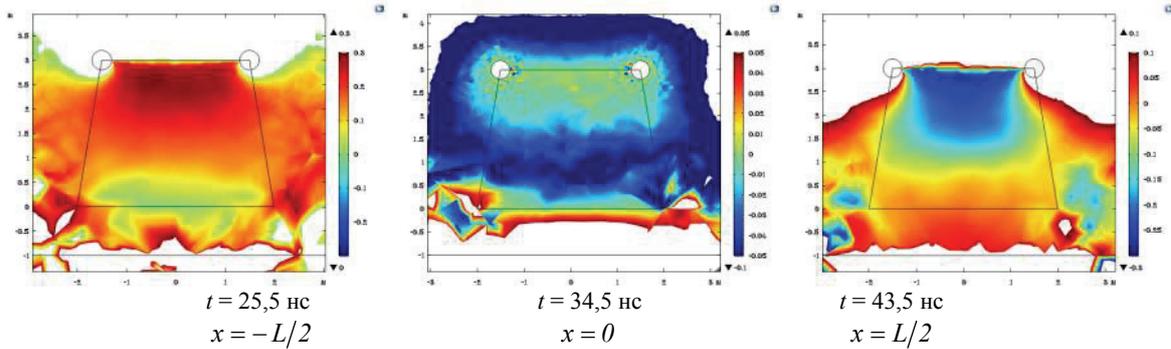


Рисунок 14 – Распределение $\sin(\alpha_H)$ в момент прохождения максимума импульса в трех различных сечениях YZ горизонтальной части ПС

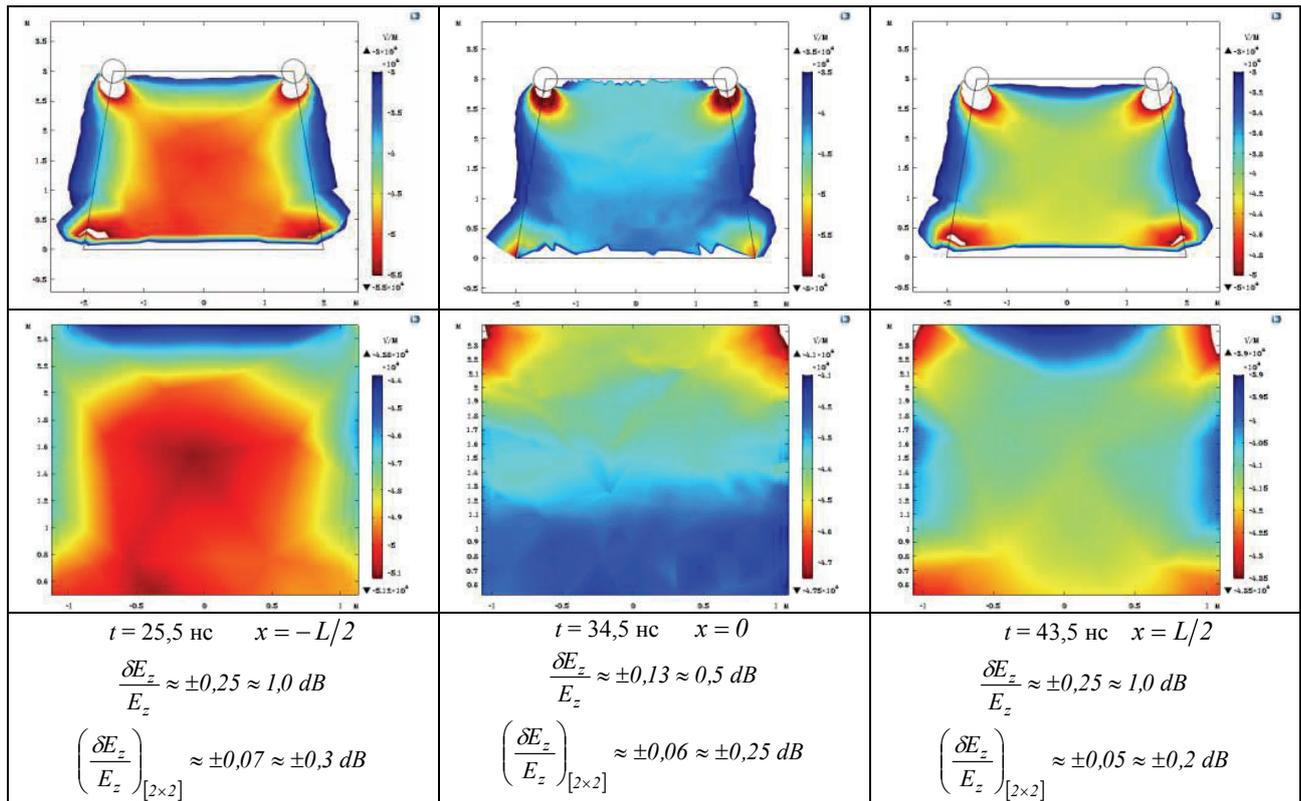


Рисунок 15 – Распределение E_z в момент прохождения максимума импульса в трех различных сечениях YZ горизонтальной части ПС

Для центральной части $2 \times 2 \text{ м}^2$ (что составляет более половины по ширине и высоте горизонтальной части ПС) неоднородность поля не превышает $\pm 15 \%$, что составляет $\pm 0,6 \text{ dB}$. При этом в центральном сечении горизонтальной области неоднородность еще ниже и не превышает (в квадрате $2 \times 2 \text{ м}^2$) $\pm 0,3 \text{ dB}$.

Другие компоненты поля составляют не более 5% от основных в центральной части горизонтальной секции ПС длиной около 3 м и на расстоянии от токопроводящих элементов не менее 0,3 м. Это было показано в предыдущем подразделе при анализе соответствия формы волны TEM типу.

Продольное распределение напряженностей электрической и магнитной компонент TEM-волны (вдоль оси X) формируется в основном его временными параметрами и незначительно искажается особенностями формы ПС. Более подробно эти зависимости рассмотрены в следующем подразделе.

4.4 Анализ искажений в форме временного представления импульса в каждой точке исследуемого объема

4.4.1 Методика анализа временного характера импульса в различных областях ПС

В отличие от распределения поля в поперечном сечении ПС, в продольном требуется обеспечить не его однородность, а соответствие исходному профилю (рис. 10). Для анализа этого соответствия рассчитывается:

- распределение компонент поля вдоль оси X на разных расстояниях от краев и от центра ПС;
- временную зависимость компонент поля в заданных точках;
- границы области, в которой форма временной зависимости компонент поля отличается от заданной в ТЗ не более, чем на допустимое значение.

Распределения напряженности электрического

поля (компонента E_z) вдоль горизонтальных линий на высоте 1 м и 2 м над проводящей плоскостью в пределах горизонтальной части полосковой линии длиной

5 м (показано красными отрезками на рис. 17) представлено на рис. 18.

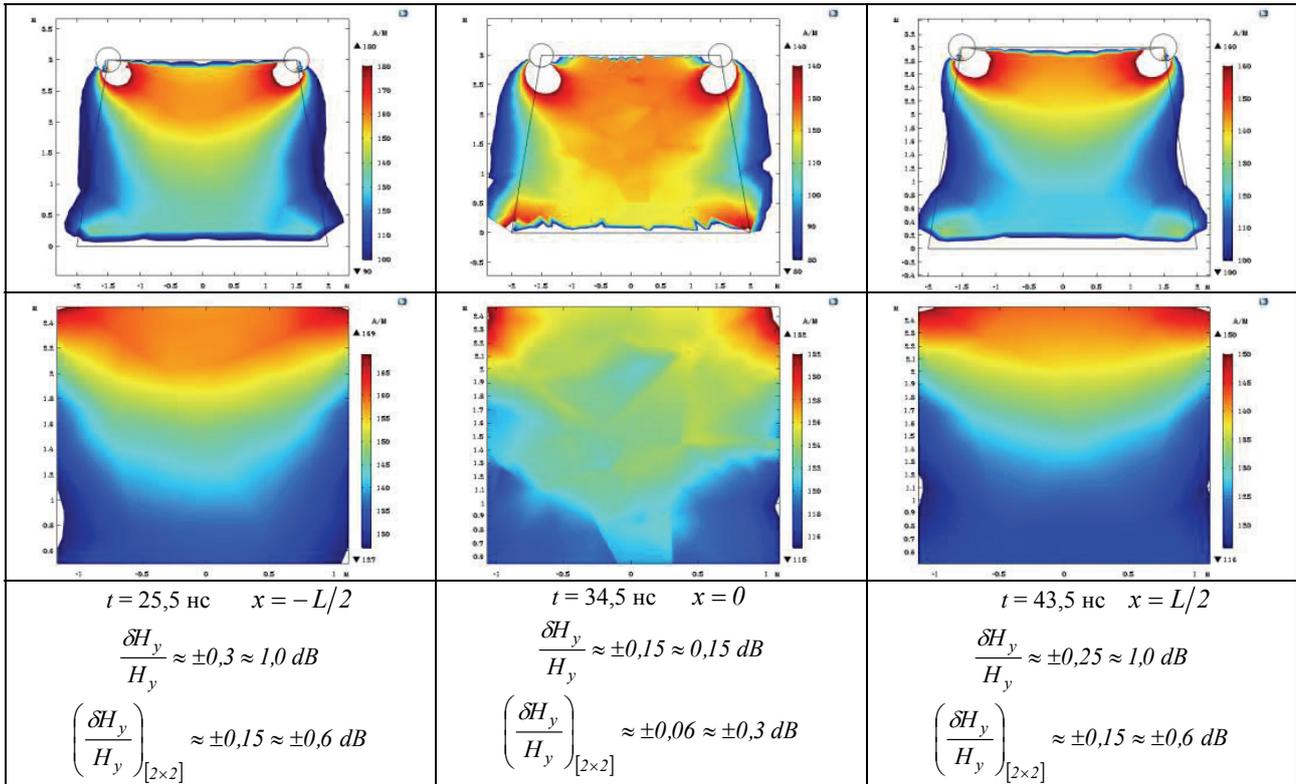


Рисунок 16 – Распределение H_y в момент прохождения максимума импульса в трех различных сечениях YZ горизонтальной части ПС

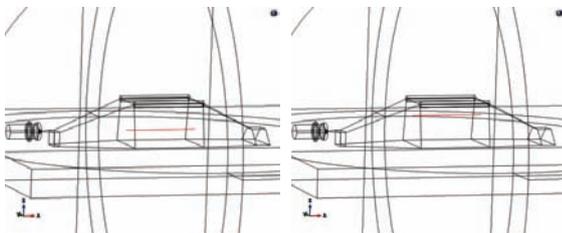


Рисунок 17 – Горизонтальные линии на высоте 1 м и 2 м над проводящей плоскостью в пределах горизонтальной части полосковой линии длиной 5 м, вдоль которых выводятся значения компонента поля E_z

Каждая линия на рис. 18 соответствует определенному моменту времени. Интервал между линиями – 2,5 нс. Они оказываются смещены друг относительно друга на 75 см, что соответствует перемещению фронта волны в ПС со скоростью света.

Для сравнения в том же масштабе ниже приведен заданный в ТЗ временной профиль сигнала. Из сравнения рисунков видно, что в течение прохода фронта волны по центральной области горизонтальной части системы (2 м за 6,7 нс) форма сигнала практически не искажается. Видимые отклонения не превышают погрешностей, вызванных неоднородностью сеточного разбиения объема системы. Можно отметить незначительное (до 20 %) уширение переднего профиля волны. С увеличением высоты проведения профиля искажения уменьшаются.

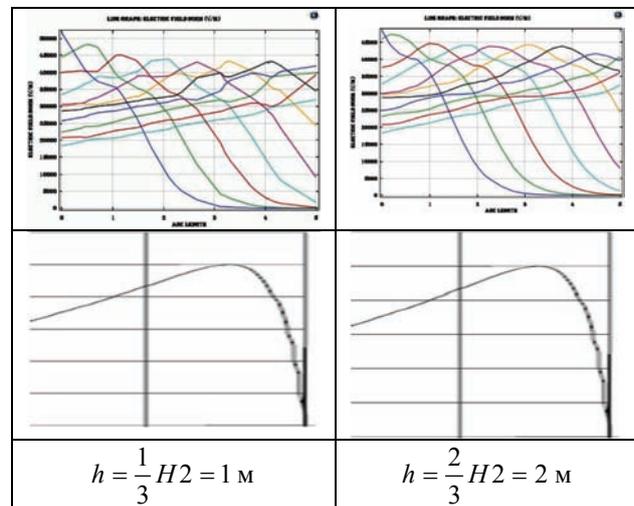


Рисунок 18 – Распределения напряженности электрического поля (компонента E_z) вдоль горизонтальной линии на высоте 1 м и 2 м над проводящей плоскостью в пределах горизонтальной части полосковой линии длиной 5 м

Временная зависимость напряженности электрического поля выводилась в фиксированных точках центрального продольного сечения ПС, как показано на рис. 19.

Результаты анализа динамики поля в различных точках показывают:

– временная динамика компонента E_z электрического поля может быть представлена как наложение

прямого импульса и отраженного импульса меньшей амплитуды. Это наглядно видно на рис. 20 с (логарифмическая шкала);

– в горизонтальной части ПС на длине 4 м (из 5 м) форма импульса практически не меняется, постепенно снижая амплитуду на 10 %;

– искажения формы импульса практически не зависят от точки контроля в пределах горизонтальной области ПС. Они связаны с наложением отраженного от границ области сигнала и не превышают 0.6 дБ. Для их уменьшения можно использовать плавные переходы между областями ПС и распределенную (по X) нагрузку на ее выходе;

– в центральном сечении горизонтальной части ПС форма и амплитуда импульса практически не зависят от высоты расположения датчика. Амплитуды в центральной точке ($z = 1,5\text{ м}$) и на высоте 5 см от нижней поверхности ($z = 0,05\text{ м}$) отличаются не более, чем на 5 %.

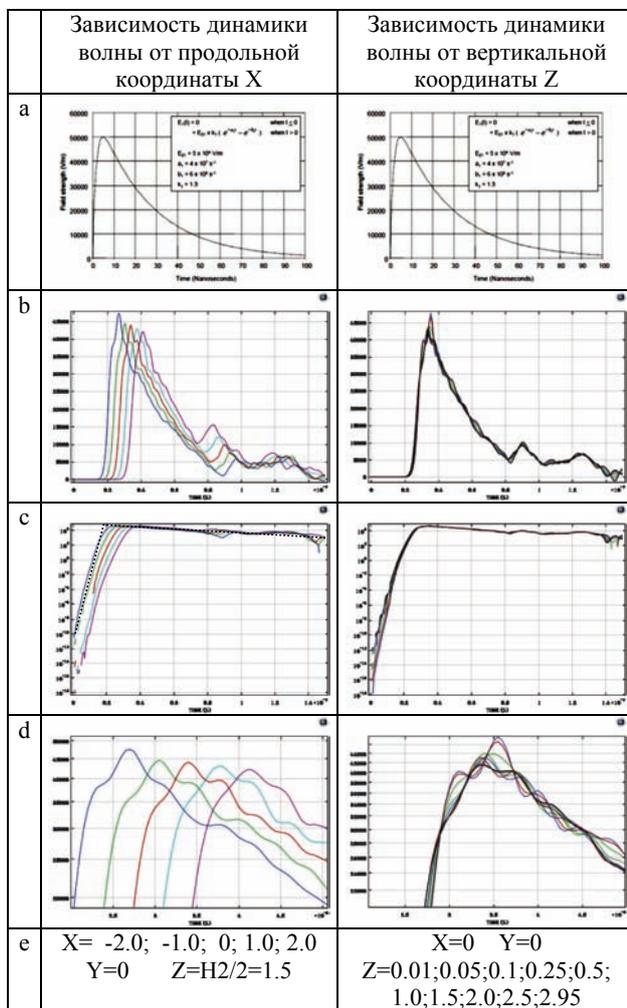


Рисунок 19 – Временная зависимость напряженности электрического поля в фиксированных точках центрального продольного сечения ПС

5 Оптимизация нагрузки

Оптимизация нагрузки необходима для подавления отраженной волны, которая искажает динамику прохождения фронта прямой волны. В качестве критерия качества оптимизации было выбрано отношение

амплитуды обратного и прямого импульса, проходящего через выбранное поперечное сечение ПС.

Отношение рассчитывалось для средней по сечению плотности потока энергии, а также для вертикальной компоненты E_z электрического поля. Для оптимизации были выбраны два сечения – в центре горизонтальной части ПС ($x = 0$) и на выходе из нее ($x = 2,5\text{ м}$).

На рис. 20 слева изображено семейство зависимостей плотности потока энергии, усредненной по площади поперечного сечения ПС ($x = 2,5\text{ м}$), при различных значениях нагрузки: 200 Ом, 175 Ом, 150 Ом, 125 Ом, 100 Ом. Наиболее близкой к требуемой форме импульса оказалась кривая при значении нагрузки 125 Ом. При этом амплитуда отраженной волны (оцененная как амплитуда «всплеска» на кривой экспоненциального затухания в момент времени 78 нс) составляет не более 2% от амплитуды первичного импульса в этом сечении.

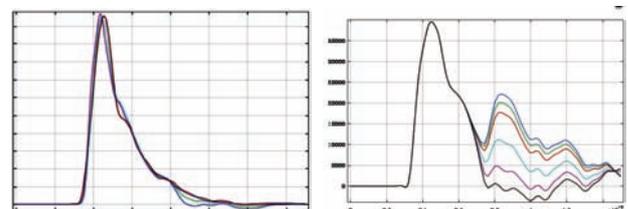
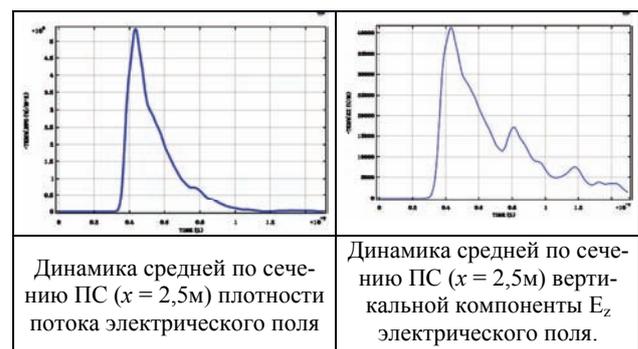


Рисунок 20 – Примеры расчетов по оптимизации нагрузки: плотности потока мощности волны, и компоненты поля E_z , усредненной по сечению ПС

На рис. 20 справа показана динамика среднего по сечению ($x = 2,5\text{ м}$) значения E_z при нагрузке 200, 175, 150, 100, 67,50 Ом (сверху вниз). При этом оказывается, что всплески, соответствующие отраженной волне, присутствуют при любой нагрузке. Но ее оптимизация позволяет сместить среднее значение E_z ближе к форме не искаженного импульса. Этот результат достигается при нагрузке в 67 Ом.



Динамика средней по сечению ПС ($x = 2,5\text{ м}$) плотности потока электрического поля

Динамика средней по сечению ПС ($x = 2,5\text{ м}$) вертикальной компоненты E_z электрического поля.

Рисунок 21 – Оптимизация нагрузки по плотности потока энергии дает значение 125 Ом (слева). На графике динамики $E_z(t)$ (справа) наблюдаются два пика, соответствующие приходу однократно и двукратно отраженной волны

Следует отметить, что результаты оптимизации по компоненте E_z поля и по плотности потока энергии дают различные результаты. Так, на рис. 21 показаны результаты расчетов для нагрузки 125 Ом, при которой динамика плотности потока энергии практически не отличается от динамики требуемого импульса. На

графике $E_z(t)$ при этой нагрузке видны два «всплеска», по времени соответствующие приходу однократно и двукратно отраженной (от границ конусной части ПС) волны.

Аналогичные результаты оптимизации наблюдаются при анализе динамики параметров поля в центральном сечении и в центральной точке ПС.

Эффект невозможности полной компенсации отраженной волны связан с широким спектром входного импульса и дисперсией волнового сопротивления ПС. Для более качественной компенсации отраженного импульса требуется использовать распределенную (по оси x) в конусной части ПС нагрузку. Тем не менее, из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что нагрузка 125 Ом обеспечивает достаточное поглощение прямого импульса и удовлетворяет требованиям стандарта [1].

6 Влияние близости грунта к нижней плоскости ПС

Для анализа влияния близости грунта на формирование распределения поля в ПС были просчитаны 2 модели: с расстоянием до бетонного основания 1 м и с ПС, расположенной непосредственно на бетонном основании.

Сравнение проводилось на основе анализа поперечного и продольного сечений ПС, проходящих через ее центр. Результаты моделирования представлены на рис. 22 - 24.

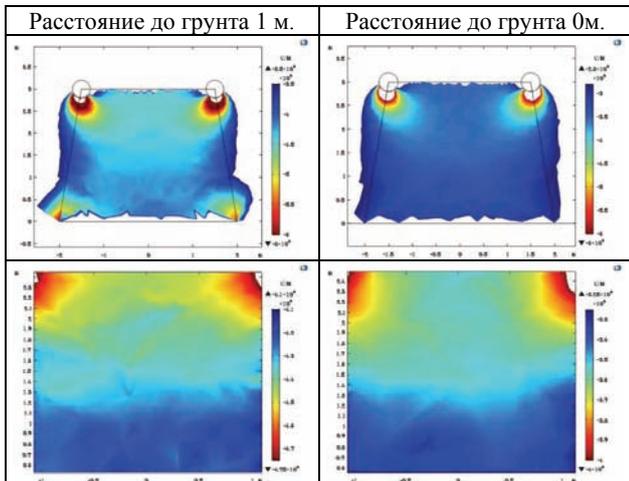


Рисунок 22 – Распределение напряженности E поля в поперечном сечении ПС

Анализ результатов моделирования показывает, что:

- уменьшение расстояния до грунта (с 1 м до 0 м) увеличивает неоднородность распределения поля по высоте с $\pm 6\%$ до $\pm 13\%$;
- в области $2 \times 2 \text{ м}^2$ соответственно с $\pm 3\%$ до $\pm 7\%$;
- уменьшение расстояния до грунта (с 1 м до 0 м) незначительно искажает форму импульса;
- уменьшение расстояния до грунта (с 1 м до 0 м) уменьшает амплитуду волны на 15%.

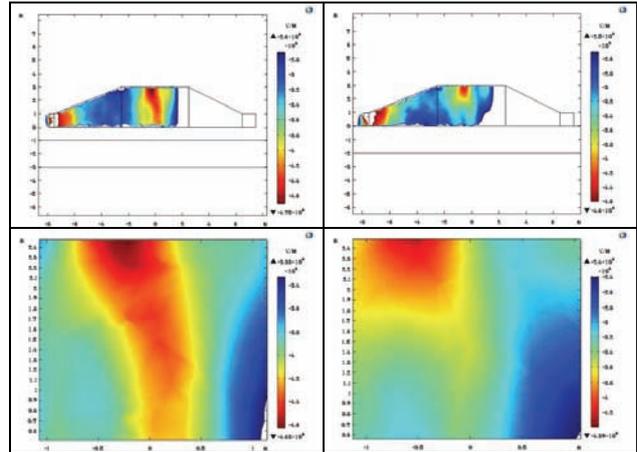


Рисунок 23 – Распределение напряженности E поля в продольном сечении ПС

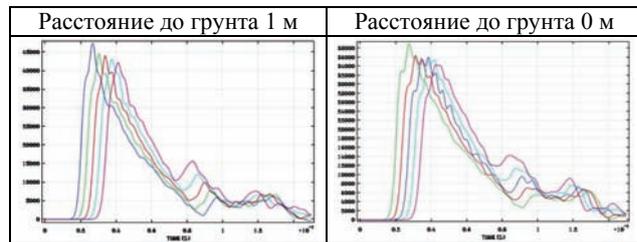


Рисунок 24 – Анализ влияния близости грунта на формирование распределения поля в ПС. Приведены временные зависимости компоненты E_z напряженности электрического поля в различных точках прямого сектора ПС, расположенной на расстоянии до бетонного основания 1 м (слева) и с ПС, расположенной непосредственно на бетонном основании (справа)

7 Анализ распространения волны во внешней относительно ПС области

Для оценки распространения волны за пределами ПС использована модель с расширенной областью внешнего пространства, ограниченного сферой радиусом 250 м. Исследовалось распределение компоненты вектора напряженности электрического поля E_z в различные моменты времени. Далее приведены отдельные кадры из него. Различными цветами обозначены границы областей, соответствующие значениям E_z , равным 10, 20, 40, 80, 160 и 320 В/м.

Анализ полученных распределений показывает, что граница каждой из областей сначала расширяется, а затем сужается. Максимальный размер области с границей 320 [В/м] составляет около 50 м, а 10 [В/м] – 200 м, что подтверждает предварительные аналитические оценки.

Выводы. Проведенное численное моделирование и анализ его результатов для ПС типа – полосковая несимметричная линия с переходными секциями и горизонтальной частью позволяет сделать следующие выводы:

Результаты общего анализа

В горизонтальной области ПС поле распространяется без геометрических и временных искажений, достигая максимального значения напряженности 50 кВ/м. При этом в верхней части области фронт волны незначительно отстает от фронта волны в нижней части, что связано с особенностями геометрии ПС.

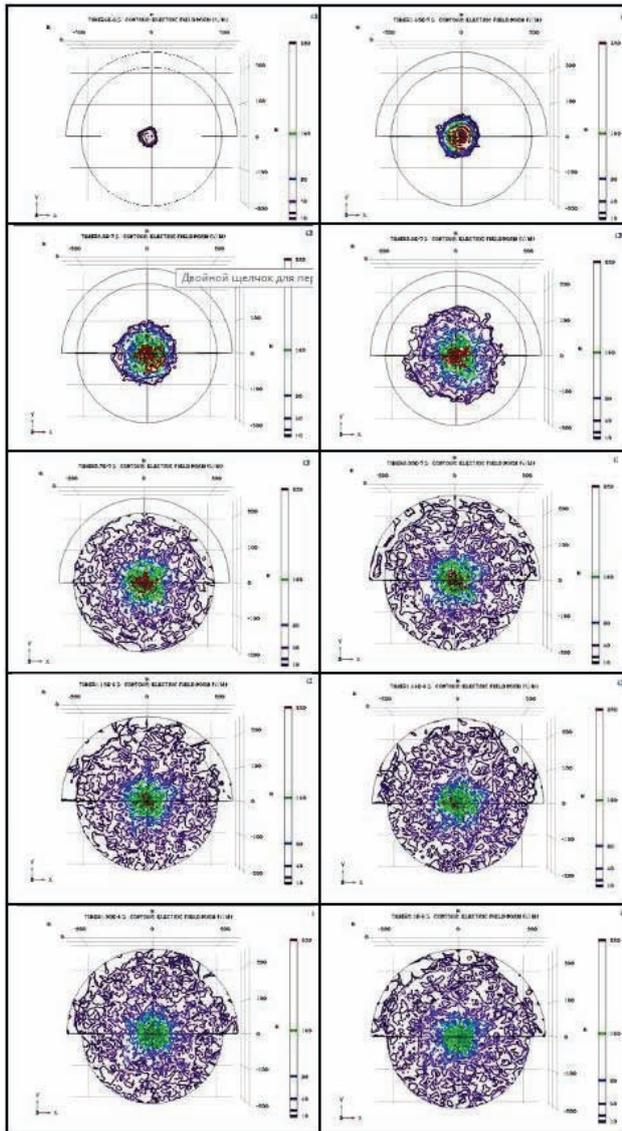


Рисунок 25 – Границы областей, соответствующие значениям E_z , равным 10, 20, 40, 80, 160 и 320 В/м в различные моменты времени в течение 2 мкс от начала подачи импульса

Результаты анализа распределений поля

В прямой области ПС (исключая края токопроводящих элементов) вектора напряженности электрического и магнитного полей отклоняются от сечения YZ не более, чем 0,3 рад на краях горизонтальной области и не более, чем на 0,05 рад в ее центре.

Форма волны отклоняется от волны ТЕМ-типа не более, чем на 5 % в центральной области длиной около 3 м и на расстоянии от токопроводящих элементов не менее 0,3 м.

При прохождении фронта импульса в горизонтальной части ПС неоднородность распределения электрического поля (компонента E_z) и магнитного (компонента H_y) не превышает ± 3 0% от среднего значения, что составляет ± 1 дБ.

Для центральной части $2 \times 2 \text{ м}^2$ (что составляет более половины по ширине и высоте горизонтальной части ПС) неоднородность поля не превышает ± 15 %, что составляет $\pm 0,6$ дБ. При этом в центральном сечении горизонтальной области неоднородность еще ни-

же и не превышает в квадрате $2 \times 2 \text{ м}^2 \pm 0,3$ дБ.

Результаты анализа динамики поля

Продольное распределение напряженностей электрической и магнитной компонент ТЕМ-волны (вдоль оси X) формируется в основном его временными параметрами и незначительно искажается особенностями формы ПС.

Временная динамика компоненты E_z электрического поля может быть представлена как наложение прямого импульса и отраженного импульса меньшей амплитуды.

В горизонтальной части ПС на длине 4 м (из 5 м) форма импульса практически не меняется, постепенно снижая амплитуду на 10%.

Искажения формы импульса практически не зависят от точки контроля в пределах горизонтальной области ПС. Они связаны с наложением отраженного от границ области сигнала и не превышают 0,6 дБ. Для их уменьшения можно использовать плавные переходы между областями ПС и распределенную (по X) нагрузку на ее выходе.

В центральном сечении горизонтальной части ПС форма и амплитуда импульса практически не зависят от высоты расположения датчика. Амплитуды в центральной точке ($z = 1,5$ м) и на высоте 5 см от нижней поверхности ($z = 0,05$ м) отличаются не более, чем на 5%.

Результаты анализа волнового и входного импеданса ПС

Однородность распределения характеристического (поверхностного) импеданса в центральном поперечном сечении ПС наблюдается на двух промежутках времени, соответствующих времени прохождения фронта волны через это сечение и по рупорной части ПС.

Эффект невозможности полной компенсации отраженной волны связан с широким спектром входного импульса и дисперсией волнового сопротивления ПС. Для более качественной компенсации отраженного импульса требуется использовать распределенную (по оси X) в конусной части ПС нагрузку.

Нагрузка ПС 125 Ом обеспечивает достаточное поглощение прямого импульса и удовлетворяет требованиям стандарта [1].

Результаты анализа влияния близости «грунта»

Уменьшение расстояния до грунта с характеристиками бетона (с 1 м до 0 м) увеличивает неоднородность распределения поля по высоте с ± 6 % до ± 13 %. В области $2 \times 2 \text{ м}^2$ на ± 3 % и ± 7 %, соответственно. Увеличение проводимости грунта, очевидно, степень влияния будет возрастать.

Уменьшение расстояния до грунта (с 1 м до 0 м) незначительно искажает форму импульса.

Уменьшение расстояния до грунта (с 1 м до 0 м) уменьшает амплитуду волны на 15 %.

Результаты анализа распространения поля во внешнее пространство

Граница областей, ограниченных пороговым значением напряженности, сначала расширяется, а затем сужается. Максимальный размер области с границей 320 В/м составляет около 50 м, а 10 В/м – 200 м.

Список літератури:

1. MIL-STD-461G Department of defence interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.
2. IEC/TR 61000-1-3:2002 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-3: General – The effects of high-altitude EMP (HEMP) on civil equipment and systems.
3. IEC/TR 61000-1-5:2004 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-5: General – High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems.
4. IEC 61000-2-9:1996 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment - Radiated disturbance. Basic EMC publication
5. IEC 61000-2-10:1998 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-10: Environment – Description of HEMP environment – Conducted disturbance.
6. IEC 61000-2-11:1999 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-11: Environment – Classification of HEMP environments.
7. IEC 61000-2-13:2005 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-13: Environment – High-power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted.
8. IEC 61000-4-18:2006 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-18: Testing and measurement techniques – Damped oscillatory wave immunity test.
9. IEC 61000-4-23:2016 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-23: Testing and measurement techniques – Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances.
10. IEC 61000-4-24:2015 Electromagnetic compatibility (EMC) –Part 4: Testing and measurement techniques – Section 24: Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance – Basic EMC Publication.

Bibliography (transliterated):

1. MIL-STD-461G Department of defence interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.
2. IEC/TR 61000-1-3:2002 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 1-3: General – The effects of high-altitude EMP (HEMP) on civil equipment and systems.
3. IEC/TR 61000-1-5:2004 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 1-5: General – High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems.
4. IEC 61000-2-9:1996 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance. Basic EMC publication
5. IEC 61000-2-10:1998 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2-10: Environment – Description of HEMP environment – Conducted disturbance.
6. IEC 61000-2-11:1999 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-11: Environment – Classification of HEMP environments.
7. IEC 61000-2-13:2005 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2-13: Environment – High-power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted.
8. IEC 61000-4-18:2006 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-18: Testing and measurement techniques – Damped oscillatory wave immunity test.
9. IEC 61000-4-23:2016 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-23: Testing and measurement techniques – Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances.
10. IEC 61000-4-24:2015 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4: Testing and measurement techniques – Section 24: Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance – Basic EMC Publication.

Поступила (received) 20.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методика розрахункової оцінки просторового розподілу амплітудно-часових параметрів електромагнітного імпульсу в полеутворюючій системі полозкового типу / В. В. Князев, С. І. Мельник, С. П. Шаламов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 18-32. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Методика расчётной оценки пространственного распределения амплитудно-временных параметров электромагнитного импульса в полеобразующей системе полоскового типа / В. В. Князев, С. И. Мельник, С. П. Шаламов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 18-32. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Numerical simulation of spatial distribution of amplitude-time parameters of electromagnetic pulse in field-forming systems of stripline type / V.V. Kniaziev, S.I. Mel'nik, S.P. Shalamov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 18-32. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Князев Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел./факс: (057) 707-68-68, e-mail: knyaz2@i.ua

Князев Владимир Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел./факс: (057) 707-68-68, e-mail: knyaz2@i.ua

Kniaziev Volodymyr Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior staff scientist, Principal scientist of NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", Phone/Fax: (057) 707-68-68, e-mail: knyaz2@i.ua

Мельник Сергій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник Інституту радіоелектроніки НАНУ, e-mail: smelnyk@yandex.ua

Мельник Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института радиоэлектроники НАНУ, e-mail: smelnyk@yandex.ua

Mel'nik Sergiy Ivanovych - Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior staff scientist of Institute of Radioelectronics NASU, e-mail: smelnyk@yandex.ua

Шаламов Станіслав Павлович – аспірант НТУ «ХПІ», тел.: 066-62-60-187, e-mail: shalamov.stas@mail.ru.

Шаламов Станислав Павлович – аспірант НТУ «ХПІ», тел.: 066-62-60-187, e-mail: shalamov.stas@mail.ru

Shalamov Stas Pavlovich – Post-graduate of NTU "KhPI", tel.: 066-62-60-187, e-mail: shalamov.stas@mail.ru

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, Л.В. ВАВРИВ, И.В. ЯКОВЕНКО**ВОЗБУЖДЕНИЕ ГЕЛИКОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ
В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭМИ**

Робота пов'язана з вивченням особливостей збудження магнітоплазмових коливань, які поширюються під кутом до паралельного межі постійного магнітного поля. Серед такого типу коливань особливе місце займають поверхневі гелікони. Отримані в даній роботі результати досліджень взаємодії поверхневих геліконів з рухомими уздовж межі джерелами електромагнітного випромінювання відкривають нові можливості реєстрації повільних магнітоплазмових хвиль в умовах впливу зовнішнього ЕМІ. В основі механізму перетворення кінетичної енергії джерела в електромагнітне випромінювання лежить резонансна взаємодія зарядженої частинки з полем монохроматичної хвилі.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, нестійкість, генерування, випромінювання, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

Настоящая работа связана с изучением особенностей возбуждения магнитоплазменных колебаний распространяющихся под углом к параллельному границе постоянному магнитному полю. Среди такого типа колебаний особое место занимают поверхностные геликоны. Полученные в данной работе результаты исследований взаимодействия поверхностных геликонов с движущимися вдоль границы источниками электромагнитного излучения, открывают новые возможности регистрации медленных магнитоплазменных волн в условиях воздействия внешнего ЭМИ. В основе механизма преобразования кинетической энергии источника в электромагнитное излучение лежит резонансное взаимодействие заряженной частицы с полем монохроматической волны.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, неустойчивость, генерация, излучение, заряженные частицы, поверхностные волны.

The work is connected with investigation of features of excitation of magnetoplasma oscillations propagating at an angle to constant, parallel to the boundary, magnetic field. Surface helicons occupy a special place among the oscillations of such type. Results of investigations of interaction of surface helicons with sources of electromagnetic radiation moving along the boundary, obtained in the work, open new possibilities of registration of slow magnetoplasma waves under the action of external EMP. Resonant interaction of the charged particle with field of monochromatic wave underlies a mechanism of transformation of kinetic energy of the source into electromagnetic radiation.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor, instability, generation, radiation, charged particles, surface waves.

Введение. Задачи преобразования энергии потоков заряженных частиц, наведенных внешним электромагнитным излучением (ЭМИ) в энергию колебаний полупроводниковых структур, комплекующих электрорадиоизделия, находят все больше практическое применение при разработке методов защиты и регистрации внешнего электромагнитного влияния.

В полупроводниковой электронике особое место занимают колебания магнитоактивной полупроводниковой плазмы. Это связано с тем, что постоянное магнитное поле приводит к существенному изменению и обогащению спектра электромагнитных колебаний. Условия существования, дисперсионные, поляризационные и энергетические характеристики этих волн существенно зависят не только от величины, но и от ориентации постоянного магнитного поля, что определяет их преимущества перед объемными.

Поверхностные магнитоплазменные волны наиболее хорошо изучены в геометрии Фойгта, когда волны распространяются поперек магнитного поля. Именно в этой конфигурации впервые была показана возможность существования поверхностных электромагнитных волн на границе гиротропной среды [1]. К настоящему времени свойства поверхностных магнитоплазменных волн в геометрии Фойгта исследованы как на поверхности металлов, так и полупроводниковой плазмы [4].

Настоящая работа связана с изучением особенностей возбуждения магнитоплазменных колебаний распространяющихся под углом к параллельному границе постоянному магнитному полю. Среди такого типа колебаний особое место занимают поверхностные геликоны. Эти волны обладают рядом интересных особенностей [1]: область их существования не зависит от соотношений между частотой сигнала и столкновений носителей, они имеют относительно малые фазовые скорости и могут взаимодействовать с акустическими колебаниями в полупроводниках. Полученные в данной работе результаты исследований взаимодействия поверхностных геликонов с движущимися вдоль границы источниками электромагнитного излучения, открывают новые возможности регистрации медленных магнитоплазменных волн в условиях воздействия внешнего ЭМИ. В основе механизма преобразования кинетической энергии источника в электромагнитное излучение лежит резонансное взаимодействие заряженной частицы с полем монохроматической волны.

Основные результаты. В работе исследуются особенности излучения геликоновых волн заряженной частицей, движущейся в магнитоактивной плазме твердого тела. В плазме твердого тела, где важную роль играют столкновения частиц, эти волны пред-

ставляют собой в некотором смысле уникальное явление: они могут распространяться в широком диапазоне частот, слабо затухая, вне зависимости от соотношений между частотой сигнала и частотой соударений носителей электричества. Геликоны имеют квадратичный закон дисперсии и малые фазовые скорости. Их поляризация является эллиптической в плоскости перпендикулярной направлению постоянного магнитного поля H_0 , а компонента электрического поля вдоль H_0 мала [2].

Очевидно, что при движении заряженной частицы вдоль постоянного магнитного поля ее взаимодействие с электрическим полем геликона очень слабо. Поэтому для более эффективного взаимодействия заряд должен иметь отличные от нуля компоненты скорости поперек H_0 , т.е. двигаться по винтовой линии.

Рассмотрим взаимодействие геликона и частицы, движущейся в магнитоактивной плазме по винтовой траектории относительно постоянного магнитного поля. Систему координат выбираем таким образом, чтобы ось OZ была параллельна направлению H_0 , вдоль которого частица движется с постоянной скоростью v_{0z} . Компоненты скорости вдоль оси X и Y соответственно равны:

$$v_{0x} = -R\omega_H \sin \omega_H t; \quad v_{0y} = -R\omega_H \cos \omega_H t. \quad (1)$$

где R – ларморовский радиус, ω_H – циклотронная частота электрона с зарядом e и массой m .

Заряженная частица создает в плазме ток, плотность которого определяется формулой:

$$\vec{j} = e\vec{v}\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)\delta(z-v_{0z}t), \quad (2)$$

где

$$x_0 = R \cos \omega_H t; \quad y_0 = -R \sin \omega_H t. \quad (3)$$

Система уравнений, описывающая взаимодействие частицы с геликоном, в замагниченной плазме имеет вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \quad \vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{u} \vec{H}_0] = 0; \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}; \quad \vec{D} = 4\pi n_0 \int_{-\infty}^t \vec{u} dt, \end{aligned} \quad (4)$$

где \vec{u} – скорость электронов проводимости среды, n_0 – их концентрация. Воспользовавшись разложением Фурье, представим электромагнитное поле, создаваемое частицей, в виде совокупности пространственно-временных гармоник. Например, напряженность электрического поля в среде в произвольной точке \vec{r} в момент времени t определяется формулой:

$$E(\vec{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \int d\vec{q} E(\omega, \vec{q}) e^{i(\vec{q}\vec{r} - \omega t)}, \quad (5)$$

где \vec{q} – волновой вектор, ω – частота волны. Тогда из уравнения (4) для Фурье-компонент напряженности электрического поля \vec{E} получим:

$$\begin{aligned} E_x(\omega, \vec{q}) &= \frac{4\pi i \omega}{c^2 \Delta} \times \\ &\times \left[(q_x^2 + q_z^2) j_x + \left(q_x q_y + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xy} \right) j_y \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_y(\omega, \vec{q}) &= \frac{4\pi i \omega}{c^2 \Delta} \times \\ &\times \left[\left(q_x q_y - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xy} \right) j_x + (q_y^2 + q_z^2) j_y \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{Здесь} \quad \Delta = q^2 q_z^2 + \frac{\omega^4}{c^4} \varepsilon_{xy}^2; \quad \varepsilon_{xy} = -\varepsilon_{yx} = \frac{4\pi i e n_0 c}{\omega H_0}.$$

При этом Фурье-компоненты плотности тока, создаваемого частицей, равны:

$$\begin{aligned} j_x(\omega, \vec{q}) &= -\frac{i e R \omega_H}{2(2\pi)^3} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in(\varphi + \frac{\pi}{2})} J_n(q_{\perp} R) (\delta^+ - \delta^-); \\ j_y(\omega, \vec{q}) &= -\frac{e R \omega_H}{2(2\pi)^3} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in(\varphi + \frac{\pi}{2})} \times J_n(q_{\perp} R) (\delta^+ + \delta^-); \\ j_z(\omega, \vec{q}) &= \frac{e v_{0z}}{(2\pi)^3} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in(\varphi + \frac{\pi}{2})} \times J_n(q_{\perp} R) \delta(\omega - q_z v_{0z} - n \omega_H). \end{aligned} \quad (7)$$

$$\delta^{\pm} = \delta[\omega - q_z v_{0z} - (n \pm 1) \omega_H]; \quad q_{\perp} = \sqrt{q_x^2 + q_y^2};$$

$q_x = q_{\perp} \cos \varphi$; $q_y = q_{\perp} \sin \varphi$; $J_n(q_{\perp} R)$ – функция Бесселя n -го порядка. При вычислении (7) использовалось соотношение:

$$e^{-iq_{\perp} R \sin \alpha} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(q_{\perp} R) e^{-in\alpha}. \quad (8)$$

Взяв значение напряженности электрического поля в точке нахождения заряженной частицы, т.е. в точке $\vec{r} = r_0(t)$; $r_0(t) = (x_0, y_0, v_{0z}t)$ и воспользовавшись для нахождения потерь энергии частицы в единицу времени формулой:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = e\vec{v}\vec{E} \Big|_{r=r_0(t)}, \quad (9)$$

получим:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{i e R \omega_H}{2} \int [E_+(\omega, \vec{q}) e^{i\omega_H t} - E_-(\omega, \vec{q}) e^{-i\omega_H t}] \times e^{i(\vec{q}r_0 - \omega t)} d\omega d\vec{q}, \quad (10)$$

где $E_{\pm}(\omega, \vec{q}) = E_x(\omega, \vec{q}) \pm i E_y(\omega, \vec{q})$.

При интегрировании (10) особая точка $\Delta = 0$ обходится снизу. Принимая во внимание геометрию задачи, в выражении (8) удобно перейти к цилиндрической системе координат. Воспользовавшись соотношением:

$$\int_0^{2\pi} e^{i(\alpha - \alpha')\varphi} d\varphi = 2\pi \delta_{\alpha\alpha'}, \quad (11)$$

выражение (10) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{i(eR\omega_H)^2}{4\pi c^2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \omega d\omega \int_{-\infty}^{\infty} dq_z \int_0^{\infty} \frac{q_{\perp} dq_{\perp}}{\Delta} \times \\ &\times \left\{ \delta^+ e^{i[(n+1)\omega_H - \omega + q_z v_z]t} \left[(q^2 + q_z^2 - 2i \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xy}) \times \right. \right. \\ &\quad \times J_n^2(q_{\perp} R) + q_{\perp}^2 J_n(q_{\perp} R) J_{n+2}(q_{\perp} R) \Big] + \\ &\quad + \delta^- e^{i[(n-1)\omega_H - \omega + q_z v_z]t} \left[(q^2 + q_z^2 + 2i \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xy}) \times \right. \\ &\quad \times J_n^2(q_{\perp} R) + q_{\perp}^2 J_n(q_{\perp} R) J_{n-2}(q_{\perp} R) \Big] \Big\} \end{aligned} \quad (12)$$

Определим потери энергии частицы на излучение В.-Ч. геликонов. В этом случае в (12) $n = \pm 1$ и $\delta^+ = \delta^- = \delta(\omega - q_z v_{0z})$. После интегрирования по ω получим:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{i(eR\omega_H)^2}{\pi c^2} v_{0z} \int_0^\infty q_\perp J_1^2(q_\perp R) dq_\perp \times \int_{-\infty}^\infty \frac{q_z dq_z}{q_\perp^2 + q_z^2 - \tilde{q}_0^2}, \quad (13)$$

где $\tilde{q} = q_0 + iq'_0$; $q_0 = \frac{4\pi en_0 v_{0z}}{H_0 c}$; $q'_0 = \frac{2\pi m_0 m v_{0z} v}{H_0^2}$,

$q_0 \gg q'_0$. Здесь q_0 – значение волнового вектора геликона в условиях черенковского резонанса $\omega_q = q_z v_{0z}$,

где $\omega_q = \frac{qq_z H_0 c}{4\pi en_0}$. Для нахождения q'_0 в уравнениях (4)

необходимо учесть эффективную частоту столкновений ν электронов проводимости, т.е.

$$m_e \tilde{m} \ddot{\mathbf{u}} = e \left[\vec{E} + \frac{1}{c} [\tilde{m} \vec{H}_0] \right], \text{ где } m_e - \text{ эффективная масса}$$

электронов проводимости. При интегрировании по q_z используем соотношение $\lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{1}{x - i\gamma} = \frac{P}{x} + i\pi\delta(x)$, где P – интеграл в смысле главного значения. Поскольку подынтегральное выражение является четной функцией q_z , то в (13) вклад дает только δ – функция и

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{(eR\omega_H)^2}{2c^2} v_{0z} \int_0^{q_0} q_\perp J_1^2(q_\perp R) dq_\perp. \quad (14)$$

Полагая $q_0 R \ll 1$, найдем потери частицы на В.-Ч. излучение геликонов:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{e^2 R^4 \omega_H^2 q_0^4 v_{0z}}{32c^2}. \quad (15)$$

Если ввести магнитный момент, создаваемый заряженной частицей, вращающейся в плоскости XY ,

$$M_{0z} = \frac{mv_\phi^2}{2H_0}, \text{ где } v_\phi^2 = v_{0x}^2 + v_{0y}^2 = R^2 \omega_H^2, \text{ то формула (15)}$$

запишется следующим образом:

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} = -\frac{M_{0z}^2 q_0^4 v_{0z}}{8}, \quad (15a)$$

т.е. потери энергии частицы на излучение В.-Ч. геликонов можно трактовать как взаимодействие магнитного диполя с магнитным полем волны, создаваемым им. Действительно, выражение (15a) следует из системы уравнений:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \quad \text{rot } \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}, \quad (16)$$

где $\vec{j} = c \text{rot } \vec{M}$; $\vec{M}(\vec{r}, t) = \vec{M}_0 \delta(x) \delta(y) \delta(z - v_{0z} t)$; $\vec{M}_0 = (0, 0, M_{0z})$ и формулы, определяющей потери энергии магнитного диполя:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -M_{0z} \left. \frac{\partial H_z}{\partial t} \right|_{x=0, y=0, z=v_{0z} t}, \quad (17)$$

т.к. $\int \vec{j} \vec{E} d\vec{r} = \int \vec{M} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} d\vec{r}$.

На возможность излучения В.-Ч. электромагнитным полем впервые обратил внимание В.Л.Гинзбург [3]. Им было показано, что это излучение мало по сравнению с излучением заряда. Действительно в квантующем магнитном поле, когда поперечная энергия осциллятора равна $\frac{\hbar\omega_H}{2}$, величина магнитного

момента равняется магнетрону Бора $\frac{e\hbar}{2mc} = 10^{-29}$ эрг/г и пренебрежимо мала по сравнению с его значением в классическом случае $M_{0z} = \frac{mv_\phi^2}{2H_0} \approx 10^{-14}$ эрг/г где $v_\phi \approx 10^8$ см/с; $H_0 \approx 10^3$ Э.

Как показывают численные оценки, излучение геликонов может быть обнаружено экспериментально в результате их возбуждения электронным сгустком (электроны должны проходить через отверстие, сделанное в образце). Если радиус отверстия меньше длины волны, то размеры отверстия не влияют на величину эффекта, т.к. магнитный момент параллелен направлению движения сгустка.

Для электронного сгустка, имеющего форму шара с радиусом $a = 10^{-1}$ см, с плотностью тока $j \sim 100$ А/см², ($v_0 = 3 \cdot 10^9$ см/с; $n_0 \sim 10^{11}$ см⁻³) потери энергии на возбуждение геликона ($\omega \sim 10^{10}$ с⁻¹, $q \sim 3$ см⁻¹) равны $\left| \frac{d\varepsilon}{dt} \right| = 10^{-2} (q_0 R)^4$ Вт. При $q_0 R \sim 10^{-1}$

$$\left| \frac{d\varepsilon}{dt} \right| \sim 1 \text{ мкВт.}$$

Из (12) при $n = \pm 1$ нетрудно найти распределение потерь энергии по углу \mathcal{G} между направлением постоянного магнитного поля и направлением распространения волн ($q_z = q \cos \mathcal{G}$; $q_\perp = q \sin \mathcal{G}$).

$$\frac{d\varepsilon}{dt d\mathcal{G}} = -\frac{(eR\omega_H)^2 R^2 q_0^4 v_{0z}}{8\pi c^2} f(\mathcal{G}); \quad (18)$$

$$f(\mathcal{G}) = \sin^3 \mathcal{G} \cos \mathcal{G}.$$

Зная потери энергии на излучение В.-Ч. геликонов, определим бесстолкновительное затухание этих волн. С этой целью представим формулу (12) при $n = \pm 1$ и $q_\perp R \ll 1$ в виде:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \sum_q \frac{d\varepsilon_q}{dt}, \quad (19)$$

где $\frac{d\varepsilon_q}{dt} = -\frac{\pi^2 (ev_\phi)^2 R^2 q^4 v_{0z}}{c^2 q_0^2 V} \cos^2 \theta \sin^2 \mathcal{G} \delta(\omega_q - q_z v_{0z})$,

e, \vec{v} заряд и скорость электронов проводимости плазмы твердого тела. $\omega_q = \frac{q^2 c H_0 \cos \mathcal{G}}{4\pi en_0}$ частота геликона,

V – объем рассматриваемого образца. Изменение числа бозонов (геликонов) в единицу времени в результате их взаимодействия с электронами проводимости n_k

в состоянии $\vec{k} = \frac{m\vec{v}}{\hbar}$ находится из кинетического уравнения :

$$\frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{\vec{k}_1, \vec{k}_2} |W_{\vec{k}_1, \vec{q}, \vec{k}_2}|^2 \delta(E_1 - E_2 - \hbar\omega_{\vec{q}}) \times \\ \times \left[(N_q + 1) n_{\vec{k}_1} (1 - n_{\vec{k}_2}) - N_q n_{\vec{k}_2} (1 - n_{\vec{k}_1}) \right]; \quad (20) \\ \vec{k}_2 = \vec{k}_1 - \vec{q},$$

в котором $N_{\vec{q}}$ – число геликонов в состоянии с волновым вектором \vec{q} ; $\hbar\omega_{\vec{q}}$ – энергия кванта электромагнитного поля геликона; $W_{\vec{k}_1, \vec{q}, \vec{k}_2}$ – матричный элемент гамильтониана взаимодействия электромагнитных колебаний и электронов. Первое слагаемое в (8.20) определяет вероятность перехода в единицу времени электрона из состояния с энергией E_1 в состояние с энергией E_2 с излучением энергии кванта электромагнитного поля $\hbar\omega_{\vec{q}}$, второе слагаемое – переход с его поглощением.

Из выражения (8.20) при условии $n_{\vec{k}_1} = 1$; $n_{\vec{k}_2} = 0$; $N_q \ll 1$ можно получить формулу для спонтанного излучения электрона проводимости. Затем воспользовавшись соотношением:

$$-\frac{d\varepsilon_{\vec{q}}}{dt} = \hbar\omega_{\vec{q}} \frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t}, \quad (21)$$

найдем выражение для матричного элемента при выполнении неравенства $q_z v_{0z} > (q_x v_x + q_y v_y)$

$$|W_{\vec{k}_1, \vec{q}, \vec{k}_2}|^2 = \frac{(ev_{\varphi})^2 \hbar \pi R^2 \omega_q}{4c^2 V} \sin^2 \vartheta. \quad (22)$$

Бесстолкновительное затухание геликона γ равно:

$$\gamma = \frac{1}{2N_{\vec{q}}} \frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t}. \quad (23)$$

Полагая в (20) $N_q \gg 1$; $n_{\vec{k}} \ll 1$ и переходя от суммирования по \vec{k} к интегрированию по импульсу $\vec{p} = \hbar\vec{k}$, получим:

$$\gamma = \frac{\pi V}{\hbar} \int d\vec{p} |W_{\vec{p}_1, \vec{q}, \vec{p}_2}|^2 [f(p_1) - f(p_2)] \times \\ \times \delta(E_1 - E_2 - \hbar\omega_{\vec{q}}), \quad (24)$$

где $f = \frac{n_{\vec{k}}}{(2\pi\hbar)^3}$ – функция распределения электронов по энергиям. Если функция распределения электронов изотропна и имеет вид $f(E) = \frac{n_0}{(2\pi m_e T)^{3/2}} e^{-\frac{E}{T}}$, то принимая во внимание, что закон дисперсии электронов является квадратичным, а $\hbar\omega_q \ll E$, получим:

$$f(E_1) - f(E_2) = \hbar\omega_{\vec{q}} \frac{\partial f(E_1)}{\partial E_1};$$

$$\delta(E_1 - E_2 - \hbar\omega_{\vec{q}}) = \frac{1}{\hbar} (q_z v_z - \omega).$$

В этом случае затухание равно:

$$\gamma_0 = -\frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{2}} \frac{q^3 c^2 v_T}{\omega_0^2} |\cos \vartheta| \sin^2 \vartheta, \quad (25)$$

ω_0 – ленгмюровская частота электронов проводимо-

сти, T – их температура в энергетических единицах, $v_T = \left(\frac{T}{m_e}\right)^{1/2}$ – тепловая скорость.

Рассмотрим взаимодействие геликонов с пучком электронов, функция распределения которых описывается выражением:

$$f_b(\vec{p}) = \frac{n_{0b}}{(2\pi m T_b)^{3/2}} \times e^{-\frac{(\vec{p}-\vec{p}_0)^2}{2mT_b}}, \quad (26)$$

n_{0b} – плотность электронов в пучке, T_b – их температура в энергетических единицах; $\vec{p}_0 = (p_{0x}, p_{0y}, p_{0z})$ – постоянная величина.

При $p_{0x} = p_{0y} = 0$ декремент (инкремент) геликонов равен:

$$\gamma_1 = \gamma_0 \frac{n_{0b}}{n_0} \sqrt{\frac{mT_b}{m_e T}} \left(1 - \frac{q_z v_{0z}}{\omega_q}\right). \quad (27)$$

Выражение (27) получено в предположении

$$\left| \frac{\omega_q}{q_z} - v_{0z} \right| \ll v_{Tb} \quad (v_{0z} - \text{постоянная скорость пучка вдоль}$$

H_0 , v_{Tb} – тепловая скорость электронов пучка).

Из (27) очевидно, что усиление геликонов возможно, если скорость пучка вдоль постоянного магнитного поля превышает фазовую скорость волны в этом же направлении.

Инкремент геликонов увеличивается при $p_{0x} \neq 0$; $p_{0y} \neq 0$ ($p_{0x}, p_{0y} \gg \sqrt{2mT_b}$). В этом случае инкремент равен:

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_1}{2} \left(\frac{M_{0z} H_0}{T_b} \right)^2. \quad (28)$$

Если параметры электронного пучка и твердотельной плазмы соответственно равны $n_{0b} = 10^{10} \text{ см}^{-3}$; $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $\frac{T_b}{T} \approx 10^2$; $\frac{m}{m_e} \approx 10^2$; $H_0 \approx 10^3 \text{ Э}$; $\omega_q \approx 10^{10} \text{ с}^{-1}$; $v_{\varphi} \approx 10^8 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$; $v_{Tb} \approx 10^7 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$; $v_{0z} = 3 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, то получим $\gamma_2 \approx 10^4 \gamma_1$ и $|\gamma_2| \approx 10 \gamma_0$.

Таким образом, потери энергии частицы, движущейся по винтовой линии относительно постоянного магнитного поля, эквивалентны потерям энергии магнитного диполя на возбуждение геликонов. При этом диполь движется вдоль H_0 . Этот механизм лежит в основе бесстолкновительного затухания (усиления) геликонов.

Выводы. Полученные в работе результаты исследований механизмов взаимодействия заряженных частиц и поверхностных геликонов могут оказаться полезными при решении практических задач диагностики и методов защиты полупроводниковых комплектов электромагнитных изделий от воздействия внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ). Это связано с рядом особенностей этой ветви магнитоплазменных колебаний. Во-первых, эти волны существуют в широком диапазоне частот, независимо от соотношения между частотой сигнала и частотой столкновений носителей заряда в классическом и квантовом магнит-

ных полях. Во-вторых, они имеют относительно малые фазовые скорости и могут взаимодействовать с акустическими колебаниями в полупроводниках, вследствие индукционной связи электронов проводимости и кристаллической решеткой. И, наконец, поскольку компоненты магнитного поля геликона малы по сравнению с электрическим полем, то на границе полупроводника с ферритом возникают, в определенных частотных интервалах, связанные геликон-спиновые поверхностные волны, которые могут быть использованы для фильтрации электромагнитных колебаний.

Кроме того, существование поверхностных геликонов к настоящему времени подтверждено экспериментально. Так, в работе [1] разработаны экспериментальные методики наблюдения медленных поверхностных волн в ограниченных образцах – поверхностных волноводах и резонаторах – и на свободной поверхности намагниченного полупроводника. Для регистрации поверхностного геликона разработана более точная меандровая методика [7], аналогичная методике встречно-штыревых преобразователей, используемых для возбуждения и приема поверхностных акустоэлектрических волн.

Количественные оценки полученных в данном разделе результатов показывают, что для исследования поверхностных геликонов в качестве активной среды, т.е. среды, где существуют магнитные диполи, может использоваться полупроводник с током, наведенный внешним ЭМ И, что расширяет возможности их экспериментального обнаружения и использования.

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 союжения 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.

References (transliterated)

1. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. Kiev: Naukova dumka. 1991. 216 p.
2. 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 storonnego jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. pp. 62–69.
7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jelektromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 154–161.
8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jelektromagnitnogo 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 jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 83–89.
10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego 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 struktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 96–103.
12. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kinetichekije mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 103–111.

Поступила (received) 20.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Збудження геліконів у напівпровідникових структурах в умовах дії ЕМВ / В.І. Кравченко, Л.В. Ваврив, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 33-38. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Возбуждение геликонов в полупроводниковых структурах в условиях воздействия ЭМИ / В.И. Кравченко, Л.В. Ваврив, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 33-38. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Helicon Excitation in Semiconductor Structures Exposed to EMP / V. Kravchenko, L. Vavriv, I. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 33-38. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, директор НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: nii90@email.ua

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: nii90@email.ua

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33, e-mail: nii90@email.ua

Ваврив Людмила Владиславівна – кандидат фізико-математичних наук, с.н.с., НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-63-09, tel. (057) 707-61-33, e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

Ваврив Людмила Владиславовна – кандидат физико-математических наук, с.н.с., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-63-09, tel. (057) 707-61-33, e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

Vavriv Lyudmyla - Candidate of Physico-Matematic Sciences, Senior Researcher, NIPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33, e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

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

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

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@ukr.net

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, Л.В. ВАВРИВ, И.В. ЯКОВЕНКО

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТОПЛАЗМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ С ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Наведено дисперсійні співвідношення для поверхневих магнітоплазмових хвиль на межі розділу середовищ вакуум-напівпровідник, показані умови виникнення, особливості поширення і спектральні характеристики поверхневих геліконів. Досліджено механізми взаємодії поверхневих геліконів з джерелами електромагнітного випромінювання (зарядженою часткою, магнітним диполем). Визначено втрати енергії цих джерел на їх збудження та проведено порівняльний аналіз ефективності збудження об'ємних і поверхневих геліконів. В рамках квантовомеханічних уявлень отримано кінетичне рівняння для геліконів, зміна числа яких обумовлено взаємодією з електронами провідності.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, нестійкість, генерування, випромінювання, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

Приведены дисперсионные соотношения для поверхностных магнитоплазменных волн на границе раздела сред вакуум-полупроводник, показаны условия возникновения, особенности распространения и спектральные характеристики поверхностных геликонов. Исследованы механизмы взаимодействия поверхностных геликонов с источниками электромагнитного излучения (заряженной частицей, магнитным диполем). Определены потери энергии этих источников на их возбуждение и проведен сравнительный анализ эффективности возбуждения объемных и поверхностных геликонов. В рамках квантовомеханических представлений получено кинетическое уравнение для геликонов, изменение числа которых обусловлено взаимодействием с электронами проводимости.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, неустойчивость, генерация, излучение, заряженные частицы, поверхностные волны.

Dispersion relations for surface magnetoplasma waves at the phase boundary vacuum-semiconductor, features of propagation and spectral characteristics of surface helicons are presented. Mechanisms of interaction of surface helicons with sources of electromag-

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Збудження геліконів у напівпровідникових структурах в умовах дії ЕМВ / В.І. Кравченко, Л.В. Ваврив, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 33-38. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Возбуждение геликонов в полупроводниковых структурах в условиях воздействия ЭМИ / В.И. Кравченко, Л.В. Ваврив, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 33-38. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Helicon Excitation in Semiconductor Structures Exposed to EMP / V. Kravchenko, L. Vavriv, I. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 33-38. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, директор НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: nii90@email.ua

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: nii90@email.ua

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33, e-mail: nii90@email.ua

Ваврив Людмила Владиславівна – кандидат фізико-математичних наук, с.н.с., НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-63-09, tel. (057) 707-61-33, e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

Ваврив Людмила Владиславовна – кандидат физико-математических наук, с.н.с., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», тел. (057) 707-63-09, tel. (057) 707-61-33, e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

Vavriv Lyudmyla - Candidate of Physico-Matematic Sciences, Senior Researcher, NIPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33, e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

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

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

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@ukr.net

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, Л.В. ВАВРИВ, И.В. ЯКОВЕНКО

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТОПЛАЗМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ С ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Наведено дисперсійні співвідношення для поверхневих магнітоплазмових хвиль на межі розділу середовищ вакуум-напівпровідник, показані умови виникнення, особливості поширення і спектральні характеристики поверхневих геліконів. Досліджено механізми взаємодії поверхневих геліконів з джерелами електромагнітного випромінювання (зарядженою часткою, магнітним диполем). Визначено втрати енергії цих джерел на їх збудження та проведено порівняльний аналіз ефективності збудження об'ємних і поверхневих геліконів. В рамках квантовомеханічних уявлень отримано кінетичне рівняння для геліконів, зміна числа яких обумовлено взаємодією з електронами провідності.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, нестійкість, генерування, випромінювання, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

Приведены дисперсионные соотношения для поверхностных магнитоплазменных волн на границе раздела сред вакуум-полупроводник, показаны условия возникновения, особенности распространения и спектральные характеристики поверхностных геликонов. Исследованы механизмы взаимодействия поверхностных геликонов с источниками электромагнитного излучения (заряженной частицей, магнитным диполем). Определены потери энергии этих источников на их возбуждение и проведен сравнительный анализ эффективности возбуждения объемных и поверхностных геликонов. В рамках квантовомеханических представлений получено кинетическое уравнение для геликонов, изменение числа которых обусловлено взаимодействием с электронами проводимости.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, неустойчивость, генерация, излучение, заряженные частицы, поверхностные волны.

Dispersion relations for surface magnetoplasma waves at the phase boundary vacuum-semiconductor, features of propagation and spectral characteristics of surface helicons are presented. Mechanisms of interaction of surface helicons with sources of electromag-

netic radiation (charged particle, magnetic field) have been investigated. Energy losses of these sources for their excitation were determined, and comparative analysis of efficiency of excitation of volumetric and surface helicons was carried out. Within the framework of quantum-mechanical concepts, the kinetic equation for helicons the number of which varies due to interaction with conduction electrons was obtained.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor, instability, generation, radiation, charged particles, surface waves.

Введение. Исследования возможностей возбуждения поверхностных плазменных колебаний потоком заряженных частиц, движущихся вдоль поверхности проводящего твердого тела, были проведены в рамках гидродинамического подхода. [1] При этом предполагалось, что поведение частиц пучка носит коллективный характер, т.е. энергия его собственных (плазменных) колебаний может преобразовываться в энергию колебаний среды.

В данной работе рассматриваются механизмы взаимодействия волн и частиц, которые реализуются без учета коллективных свойств последних, носят частично-индивидуальный характер и обусловлены выполнением резонансных соотношений между фазовыми скоростями возбуждаемых волн и скоростью источника излучения. Интерес к подобным исследованиям вызван рядом причин. Во-первых, объектом возбуждения могут выступать поверхностные волны, фазовые скорости которых меньше объемных, что расширяет возможности их возбуждения в проводящих твердых телах, где дрейфовые скорости невелики. Кроме того, источники электромагнитного излучения могут создаваться в вакууме, где скорости носителей на порядок выше дрейфовых [2,3]. Наконец, использование сторонних источников расширяет возможности возбуждения различных типов электромагнитных колебаний, поскольку выбор источника может определяться их поляризацией.

Основные результаты. В работе [1] было предсказано существование в замагниченной твердотельной плазме непотенциальных медленных поверхностных волн (поверхностных геликонов), распространяющихся под углом к постоянному магнитному полю; магнитное поле параллельно границе раздела полупроводник – вакуум. Экспериментально эти волны обнаружены в *InSb* при комнатных температурах [1].

Сформулируем условия существования поверхностных геликонов, определим их поляризацию, спектр и затухание в электронно-дырочной плазме.

Предположим, что среда «1» – вакуум ($\gamma < 0$), а среда «2» – полупроводник ($\gamma > 0$). Постоянное магнитное поле направлено вдоль оси *OZ*. Рассмотрим характеристическое уравнение для магнитоплазменных волн в замагниченной плазме:

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{xx} (q_y^2 + q_x^2)^2 + (q_y^2 + q_x^2) \times \\ & \times \left[(\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{xx}) \left(q_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xx} \right) - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xy}^2 \right] + \\ & + \varepsilon_{zz} \left(q_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xx} \right) + \frac{\omega^4}{c^4} \varepsilon_{zz} \varepsilon_{xy}^2 = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где компоненты тензора диэлектрической проницаемости ε_{ij} имеют вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_0 - \sum_{\alpha} \frac{\omega_{0\alpha}^2 (\omega + i\nu_{\alpha})}{\omega [(\omega + i\nu_{\alpha})^2 - \omega_{H\alpha}^2]}, \\ \varepsilon_{xy} = -\varepsilon_{yx} = - \sum_{\alpha} \frac{i\omega_{0\alpha}^2 \omega_{H\alpha}}{\omega [(\omega + i\nu_{\alpha})^2 - \omega_{H\alpha}^2]}, \\ \varepsilon_{zz} = \varepsilon_0 - \sum_{\alpha} \frac{\omega_{0\alpha}^2}{\omega (\omega + i\nu_{\alpha})}. \end{aligned} \quad (2)$$

Из этого уравнения следует, что в среде «2» существует две волны – необыкновенная и обыкновенная, в которых соответственно:

$$\begin{aligned} q_{y1,2}^2 = -q_x^2 + \left\{ \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xy}^2 - (\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{xx}) \left(q_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xx} \right) \pm \right. \\ \left. \pm \sqrt{\left[\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xy}^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx}) \left(q_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xx} \right) \right]^2 - 4 \frac{\omega^2}{c^2} q_z^2 \varepsilon_{zz} \varepsilon_{xy}^2} \right\} \times \\ \times (2\varepsilon_{xx})^{-1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Знак мнимой части $q_{y1,2}$ должен удовлетворять условию экспоненциального убывания амплитуды волны от границы раздела сред.

Рассмотрим область относительно низких частот и сильных магнитных полей – частота мала по сравнению с электронной циклотронной частотой:

$$qv_T < \omega < \omega_{He}.$$

Предположим, что среда обладает наибольшей проводимостью вдоль магнитного поля, и выполняются условия:

$$|\varepsilon_{zz}| \gg |\varepsilon_{xx}|, |\varepsilon_{xy}|; \quad (4)$$

$$|\varepsilon_{zz} \varepsilon_{xx}| > |\varepsilon_{xy}^2|. \quad (5)$$

Неравенство (5) может иметь место:

а) в однокомпонентных полупроводниках с относительно невысокой концентрацией носителей, когда основной вклад в компоненту ε_{xx} вносит ток смещения, и, в результате, $\varepsilon_0 \gg \frac{\omega_0^2 |\omega + i\nu|}{\omega_{H\alpha}^2 \omega}$;

б) в плотной (ток смещения мал) однокомпонентной плазме твердого тела с анизотропной массой носителей $\left(\left| \frac{\varepsilon_{xx} \varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{xy}^2} \right| \sim \frac{m_{\perp}}{m_{\parallel}} \right)$, где m_{\perp} и m_{\parallel} – эффективная

масса носителей поперек и вдоль магнитного поля); подобная ситуация наблюдается, например, в полуметаллах типа висмута или в многодолинных полупроводниках;

в) в плотной двухкомпонентной плазме с замагниченными электронами ($\omega_{He} \gg \nu_e$; $\omega_{Hh} < \nu_h$;

$\frac{\mu_e \mu_h}{c^2} H_0^2 \gg 1$, где $\mu_{\alpha} = \frac{e_{\alpha}}{m_{\alpha} \nu_{\alpha}}$ – подвижность носителей). Это условие реализуется в экспериментах по

обнаружению поверхностных геликонов в *InSb*.

При выполнении неравенств (4) – (5) получим из уравнения (1) величины $q_{y1,2}$, характеризующие глубину проникновения в среду необыкновенной и обыкновенной волны. Если предположить, что $q_z^2 \gg \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xx}$, то получим:

$$q_{y1}^2 = -\kappa^2 - \frac{\omega^4}{c^4} \frac{\varepsilon_{xy}^2}{q_z^2}; \quad (6)$$

$$q_{y2}^2 = -\frac{\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{xx}} q_z^2 - q_x^2, \quad (7)$$

где $\kappa^2 = (q_x^2 + q_z^2)$.

Так как $|q_{y2}| \gg q_x$, то характеристики распространения парциальных волн сильно различаются. При этом компоненты необыкновенной волны, приобретаю вид:

$$H_{x1} = -\frac{\left(\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{yx} + q_x q_{y1}\right)}{\kappa^2} H_{y1}; \quad (8)$$

$$H_{z1} = -\frac{\left(q_{y1} \left(q_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xx}\right) - q_x \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{yx}\right)}{\kappa^2} H_{y1};$$

$$E_{x1} = \frac{\omega}{q_z c} H_{y1};$$

$$E_{y1} = \frac{\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{yx} + q_x q_{y1}}{\kappa^2} \frac{\omega}{q_z c} H_{y1}; \quad E_{z1} = 0.$$

Компоненты обыкновенной волны удовлетворяют уравнениям

$$\text{rot } \vec{E} = 0; \quad \text{rot } \vec{H} = -\frac{i\omega}{c} \vec{D}; \quad \text{div } \vec{D} = 0; \quad \text{div } \vec{H} = 0. \quad (9)$$

В вакууме поля распадаются на H -волны ($E_z = 0$) и E -волны ($H_z = 0$). Поскольку нас интересуют медленные волны (фазовая скорость волны ω/κ существенно меньше скорости света в вакууме), компоненты полей в вакууме имеют вид:

$$E_z = 0; \quad H_x = \frac{q_x}{q_z} H_z; \quad H_y = -\frac{i\kappa}{q_z} H_z; \quad (10)$$

$$E_x = -\frac{\omega}{cq_z} H_y; \quad E_y = \frac{\omega}{cq_z} H_x;$$

$$H_z = 0; \quad H_x = \frac{\omega}{cq_z} E_x; \quad H_y = -\frac{\omega}{cq_z} E_y; \quad (11)$$

$$E_x = -\frac{q_x}{q_z} E_z; \quad E_y = -\frac{i\kappa}{q_z} E_z.$$

Дисперсионное соотношение $\kappa(\omega)$ определяется из граничных условий на плоскости $y = 0$. На границе выполняются условия непрерывности H_y и H_z компонент магнитного поля. При этом H_x компонента испытывает разрыв, связанный с бесконечно большой проводимостью плазмы вдоль H_0 , которая приводит к возникновению поверхностного тока вдоль оси Z ($E_z = 0$). Иными словами глубина проникновения

обыкновенной волны бесконечно мала и ее роль сводится к образованию поверхностного тока.

В двухкомпонентной плазме с замагниченными электронами $\left(\varepsilon_{xy} = \frac{i\omega_{0e}^2}{\omega\omega_{He}}, \varepsilon_{xx} \approx \frac{i\omega_{0h}^2}{\omega V_h}, |\varepsilon_{xx}| \ll |\varepsilon_{xy}|\right)$ для поверхностных геликонов получим:

$$\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xy} = 2iq_z^2 \frac{q_x}{\kappa}, \quad (12)$$

т.е.

$$\omega = \frac{2q_z^2 c^2 \omega_{He}}{\omega_{0e}^2} \frac{q_x}{\kappa}; \quad q_{y1} = -i \frac{q_x^2 - q_z^2}{\kappa}. \quad (13)$$

Из неравенств (4) - (5) следует, что поверхностные геликоны существуют в области углов [171]

$$1 < \text{tg}^2 \theta < \left| \frac{\varepsilon_{xx} \varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{xy}^2} \right|, \quad (14)$$

θ – угол между H_0 и двумерным волновым вектором $\kappa(q_x, 0, q_z)$. Правая часть неравенства представляет собой условие малости относительного затухания (6) поверхностного геликона, обусловленного конечной проводимостью среды вдоль магнитного поля. На основе вышеизложенного физический механизм возникновения поверхностных геликонов заключается в следующем. В ограниченной плазме твердого тела, помещенного в постоянное магнитное поле, параллельное границе раздела сред, могут быть достигнуты условия, при выполнении которых глубины проникновения необыкновенной волны значительно больше обыкновенной. В этих условиях носители заряда (электроны) оказываются «вмороженными» в магнитное поле, и при их перемещении поперек поля происходит сгущение магнитных силовых линий, т.е. возникает градиент магнитного давления. В результате электроны совершают спиралеобразное движение и создают электромагнитную волну, вращение поляризации которой совпадает с направлением вращения электрона относительно магнитного поля. Однако поле, создаваемое обыкновенной волной, производит дополнительное воздействие, нарушающее симметрию в движении электронов, что приводит к эффекту невязимного распространения поверхностных геликонов относительно направления постоянного магнитного поля.

Поверхностные геликоны обнаружены и исследовались в образцах *InSb* при комнатных температурах в различных диапазонах частот в магнитных полях до 30 кЭ [1].

Поскольку слабо затухающие поверхностные геликоны могут существовать в широком интервале частот, а их фазовые скорости малы и регулируются величиной внешнего магнитного поля, то становится возможным взаимодействие поверхностных геликонов с волнами различной природы – спиновыми, звуковыми, а также с электронными пучками.

Определим потери энергии частицы, движущейся над поверхностью полупроводника в вакууме по винтовой траектории относительно H_0 , на возбуждение поверхностных геликонов. Система координат выбрана таким образом, что плоскость $y = 0$ служит грани-

цей раздела сред, $y < 0$ – вакуум (среда «1»), $y > 0$ – полупроводник (среда «2»); $H_0 \parallel OZ$.

Пусть в вакууме на расстоянии a от полупроводника движется заряженная частица. Ее поступательная скорость вдоль оси Z – постоянная величина v_{0z} . В этом случае электромагнитные поля в вакууме определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \\ \text{rot } \vec{H} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}. \end{aligned} \quad (15)$$

Поля можно представить в виде набора пространственно – временных гармоник. Например, $\vec{E}(\vec{r}, t) = \int d\omega dq_x dq_z \vec{E}(\omega, q_x, q_z, y) \cdot e^{i(q_x x + q_z z - \omega t)}$.

Электрические и магнитные поля, создаваемые в вакууме частицей, соответственно равны:

$$\begin{aligned} \vec{E}_3(\omega, q_x, q_z, y) &= \frac{4\pi^2 i}{\kappa} \left(\frac{\omega}{c^2} \vec{j} - \vec{q} \rho \right) e^{qy}; \\ \vec{H}_3(\omega, q_x, q_z, y) &= \frac{4\pi^2 i}{c\kappa} [\vec{q} \vec{j}] e^{qy}, \end{aligned} \quad (16)$$

где ρ – плотность заряда частицы, связанная с ее током уравнением непрерывности:

$$\rho = \frac{\vec{q} \vec{j}}{\omega}; \quad (17)$$

$$j_x(\omega, q_x, q_z) = -\frac{ieR\omega_H}{2(2\pi)^3} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n J_n(|q_x|R) e^{-\kappa a} (\delta^+ - \delta^-);$$

$$j_y(\omega, q_x, q_z) = -\frac{eR\omega_H}{2(2\pi)^3} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n J_n(|q_x|R) e^{-\kappa a} (\delta^+ + \delta^-);$$

$$j_z(\omega, q_x, q_z) = \frac{ev_{0z}}{(2\pi)^3} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n J_n(|q_x|R) e^{-\kappa a} \delta(\omega - q_z v_{0z} - n\omega_H).$$

Выражения для компонент тока получены в предположении $R \ll a$. Из (17) видно, что частица, движущаяся в вакууме, создает E_{z3} компоненту электрического поля, в то время как при ее движении в замагниченной плазме эта компонента равна нулю из-за бесконечно большой проводимости вдоль оси Z .

На границе $y = 0$ $E_z^{(1)}$ должно обращаться в нуль. Очевидно, что такому условию поле частицы не удовлетворяет. Поэтому в вакууме наряду с H - волной необходимо учитывать E -волну.

Иными словами, заряженная частица, движущаяся в вакууме по винтовой траектории, создает электромагнитные поля, падающие на поверхность раздела сред. Все компоненты этих полей отличны от нуля. Волна, отраженная от поверхности $y = 0$, также должна иметь все компоненты электромагнитного поля, т.е. в вакууме необходимо учитывать E и H волны одновременно.

Таким образом, в вакууме $E_z^{(1)} = E_{z2} + E_{z3}$, $H_z^{(1)} = H_{z1} + H_{z3}$, а все остальные компоненты поля являются суперпозицией полей E и H волн и поля, созданного частицей. Например, $H_y^{(1)} = H_{y1} + H_{y2} + H_{y3}$ и т.д. На границе сред непрерывны компоненты H_y и H_z , а компонента $E_z^{(1)}$ равна

нулю. Последнее условие позволяет выразить E_{z2} , а следовательно и H_{y2} , через E_{z3} .

$$H_{y2} = -\frac{4\pi^2 i \omega q_x}{c\kappa} \left(\frac{\omega}{c^2} j_z - q_z \rho \right). \quad (18)$$

Воспользовавшись для плотности заряда соотношением (8.44), получим, что на плоскости $y = 0$:

$$\begin{aligned} H_y^{(1)}(\omega, q_x, q_z) &= \frac{i\kappa}{q_z} \left(H_{z1} - \frac{4\pi^2 i}{c\kappa} [\vec{q} \vec{j}]_z \right); \\ H_z^{(1)}(\omega, q_x, q_z) &= H_{z1} + \frac{4\pi^2 i}{c\kappa} [\vec{q} \vec{j}]_z. \end{aligned} \quad (19)$$

Выражение для H_{z1} определяется из граничных условий и равно:

$$\begin{aligned} H_{z1}(\omega, q_x, q_z) &= \frac{ieR\omega_H}{2\pi c\kappa\Delta} \times \\ &\times \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(|q_x|R) (-i)^n e^{-\kappa a} [(q_x - \kappa)\delta^+ + (q_x + \kappa)\delta^-], \\ &+ i \left(q_z^2 q_{y2} + q_x \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xy} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

где $\Delta = 1 + \frac{i \left(q_z^2 q_{y2} + q_x \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{xy} \right)}{\kappa q_z^2}$.

Выразив E_{x1} , E_{y1} через H_{z1} , найдем потери энергии частицы на возбуждение поверхностных геликонов.

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{eR\omega_H}{2c} \int d\omega dq_x dq_z \frac{\omega}{q_z^2} H_{z1}(\omega, q_x, q_z) e^{-\kappa a} \times \\ &\times \sum_{n'=-\infty}^{\infty} (i)^{n'} J_{n'}(|q_x|R) \left\{ (q_x - \kappa) e^{-i[\omega - q_z v_{0z} - (n'+1)\omega_H]t} + \right. \\ &\left. + (q_x + \kappa) e^{-i[\omega - q_z v_{0z} - (n'-1)\omega_H]t} \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

В условиях черенковского излучения, когда $\delta^+ = \delta^- = \delta(\omega - q_z v_{0z})$; $n, n' = \pm 1$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{ieR\omega_H}{c} \int d\omega dq_x dq_z \frac{\omega q_x}{q_z^2} H_{z1}(\omega, q_x, q_z) \times e^{-\kappa a} J_1(|q_x|R), \quad (22)$$

где $H_{z1}(\omega, q_x, q_z) = \frac{eR\omega_H}{\pi c\kappa\Delta} J_1(|q_x|R) e^{-\kappa a} \delta(\omega - q_z v_{0z})$.

После интегрирования по ω получим:

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{ie^2 R^2 \omega_H^2 v_{0z}}{\pi c^2} \int dq_x dq_z e^{-2\kappa a} \times \\ &\times \frac{q_x^2}{q_z \sqrt{\kappa^2 - q_0^2 + \kappa q_z - q_x q_0}} J_1^2(|q_x|R). \end{aligned} \quad (23)$$

Здесь $\text{Im } q_0$ – малая и положительная величина. Подынтегральное выражение в (23) в плоскости комплексного переменного q_z имеет полюс, значение которого q_{z0} определяется из уравнения:

$$q_x q_0 = q_z \sqrt{\kappa^2 - q_0^2} + q_z \kappa.$$

Так как $v_{0z} > 0$, то волновой вектор \vec{q} имеет положительную составляющую q_z . Тогда и $q_x > 0$. Из условия $\sqrt{\kappa^2 - q_0^2} = 0$ находим, что $q_{z\text{min}}^2 = q_0^2 - q_z^2$. В полюсе $q_{z0}^2 = \frac{q_0^2 q_x^2}{4q_x^2 - q_0^2}$, т.е. $q_{z\text{min}}^2 = \frac{q_0^2}{2}$. Взяв интеграл по d_z , получим

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} = -\frac{8e^2 R^2 \omega_H^2 v_{0z}}{c^2} \times \int_{q_{x \min}}^{q_{x \max}} dq_x e^{-2\kappa a} \frac{q_z^2 (2q_x^2 - q_0^2)}{(4q_x^2 - q_0^2)^{3/2}} J_1^2(|q_x| R), \quad (24)$$

где $q_{x \max} \leq \frac{1}{a}$.

Так как $|q_x|_{\max} R \ll 1$, то потери энергии частицы на черенковское возбуждение поверхностных геликонов равны:

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} \approx -\frac{e^2 \omega_H^2 v_{0z}}{8c^2} \left(\frac{R}{a}\right)^4 \quad (25)$$

или, если ввести магнитный момент частицы

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{M_{0z}^2 v_{0z}}{a^4}. \quad (26)$$

Потери энергии частицы на возбуждение объемных геликонов в $\frac{1}{4}(q_0 a)^4$ раз меньше потерь энергии на возбуждение поверхностных геликонов. Это связано с тем, что взаимодействие частицы с поверхностным геликоном происходит в результате возбуждения E и H – волн одновременно.

Рассмотрим теперь взаимодействие поверхностных геликонов с магнитным диполем $\vec{M}(\vec{r}, t) = \vec{M}_0 \delta(x) \delta(y+a) \delta(z-v_0 t)$, $\vec{M}_0 = (0, 0, M_0)$, движущимся вдоль H_0 со скоростью v_0 на расстоянии a от границы раздела сред. В этом случае для нахождения компонент поля необходимо в плазме полупроводника воспользоваться уравнениями:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \text{div } \vec{B} = 0; \quad (27)$$

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi \vec{M}; \quad \text{rot } \vec{H} = 0.$$

Изменение энергии магнитного диполя в результате взаимодействия с поверхностным геликоном запишется:

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} = \int H_z \frac{\partial M_z}{\partial t} dV. \quad (28)$$

Представляя решения однородных и неоднородных уравнений Максвелла в виде суммы пространственно-временных гармоник, например,

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \sum_{q_x, q_z} \vec{H}(y) \exp(i(q_x x + q_z z - \omega_q t))$$

и используя граничные условия при $y=0$; $y=\pm\infty$, можно получить компоненту $H_z(\vec{r}, t)$ поверхностного геликона через M_0 . Тогда выражение для потерь энергии диполя при $q_{y1} a \ll 1$ примет вид:

$$-\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} \equiv \sum_q \hbar \omega_q \frac{\partial N_q}{\partial t} = \frac{4\pi^2 M_0^2}{S} \sum_q \omega_q^2 \frac{q_z^2}{q q_x^2} (q_x^2 - q_z^2) \delta(\omega_q - q_z v_0), \quad (29)$$

где S – площадь полупроводника, N_q – число поверхностных геликонов с энергией $\hbar \omega_q$. В таком же виде могут быть представлены и потери энергии частицы (25). Эти представления позволяют найти матричный

элемент гамильтониана взаимодействия поверхностных геликонов с заряженными частицами или магнитными диполями, составить соответствующие кинетические уравнения для поверхностных геликонов и получить соответствующие выражения для декрементов или инкрементов при наличии потока заряженных частиц. Оценим потери энергии движущегося в вакууме магнитного диполя на возбуждение поверхностных геликонов. В результате интегрирования формулы (29), они определяются следующей величиной

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} \approx -M_{0z}^2 q_0^4 v_{0z} \ln \frac{2}{a q_0}; \quad a q_0 \ll 1. \quad (30)$$

Таким образом, механизмы ВЧ излучения объемных и поверхностных геликонов различаются. Потери энергии частицы, движущейся по винтовой линии относительно постоянного магнитного поля, на возбуждение объемного геликона эквивалентны потерям энергии магнитного диполя, движущего вдоль H_0 с постоянной скоростью. Излучение поверхностного геликона происходит в результате возбуждения не только H -волн, но и E -волн, что приводит к возрастанию потерь энергии частицы. Рассмотренные явления могут иметь место в природных условиях. Например, в ионосфере, где наблюдается распространение свистящих атмосфериков (объемных геликонов), в солнечной короне, в межзвездной плазме, которую пересекают космические частицы, движущиеся с различными скоростями.

Заметим, что поверхностные геликоны существуют в условиях $q_x^2 \ll q_z^2 \left| \frac{\epsilon_{zz}}{\epsilon_{xx}} \right|$. Однако на границе

плазмы полупроводников в области высоких частот $\omega_e \geq \omega_{He}$ могут существовать косые поверхностные колебания электростатического типа. В этом случае выполняется противоположное неравенство $q_x^2 \gg q_z^2 \left| \frac{\epsilon_{zz}}{\epsilon_{xx}} \right|$. Дисперсионное уравнение этих колебаний имеет вид:

$$1 + \epsilon_{xx} + i \frac{q_x}{|q_x|} \epsilon_{xy} = 0. \quad (31)$$

т.е. $\omega(\omega \pm \omega_{He}) = \frac{\omega_0^2}{(\epsilon_0 + 1)}$ (для $q_x > 0$; $q_x < 0$ соответственно).

Оно следует из уравнений электростатики ($\text{rot } \vec{E} = 0$; $\text{div } \vec{D} = 0$) и граничных условий на поверхности вакуум – плазменная среда ($y=0$) и на бесконечности ($y=\pm\infty$).

Оценим черенковские потери заряженной частицы, движущейся в вакууме по спирали относительно H_0 на возбуждение этих колебаний. Электрические поля, создаваемые частицей, определяются выражением (8.44) и при $c \rightarrow \infty$ приобретают вид:

$$\vec{E}(\omega, q_x, q_z, y) = -\frac{ieq_x}{2\pi|q_x|} J_n(|q_x| R) e^{-|q_x|(y+a)} \delta(\omega - q_z v_{0z}). \quad (32)$$

Здесь $\vec{q} = (q_x, |q_x|, q_z)$, $y < 0$, $R \ll a$.

Полное электрическое поле в вакууме является

суперпозицией полей (11) и (22). Из граничных условий находим амплитуды поверхностных колебаний в (21) вакууме:

$$\begin{aligned} \vec{E} = & -\frac{ie}{2\pi} \int \frac{q_x}{|q_x|} \frac{(1 - \varepsilon_{xx} - i \frac{q_x}{|q_x|} \varepsilon_{xy})}{(1 + \varepsilon_{xx} + i \frac{q_x}{|q_x|} \varepsilon_{xy})} \times \\ & \times J_n(|q_x|R) e^{i|q_x|(y+a) + i(q_x x + q_z z - \omega t)} \times \\ & \times \delta(\omega - q_z v_{0z}) d\omega dq_z dq_x; \\ E_x = & \frac{q_x}{q_z} E_z; \quad E_y = -i \frac{|q_x|}{q_z} E_z. \end{aligned} \quad (33)$$

В результате интегрирования по q_z ; ω потери энергии частицы запишутся:

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} = -\frac{2e^2 \omega_0^2}{v_0 (\varepsilon_0 + 1)^2} \int_{q_{x, \min}}^{q_{x, \max}} \frac{dq_x}{|q_x|} J_n^2(|q_x|R) e^{-2|q_x|a}. \quad (34)$$

где $q_{x, \min} \approx \frac{1}{L_x}$; $q_{x, \max} \approx \frac{1}{a}$. L_x – размеры образца в направлении X . При $(|q_x|R) \ll 1$ это выражение не зависит от магнитного поля и совпадает с выражением для потерь энергии частицы, движущейся над изотропной средой на возбуждение поверхностных плазмонов. В этом случае:

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} = -\frac{2e^2 \omega_0^2}{v_0 (\varepsilon_0 + 1)^2} \ln \frac{L_x}{a}. \quad (35)$$

Заметим, что эффекты, описываемые формулой (35) играют важную роль при воздействии импульсного электромагнитного излучения на элементы радиоизделий, в которых возникают наведенные токи [7-9]. Таким образом, при движении заряженной частицы над магнитоактивной плазменной средой, ее потери энергии состоят из потерь энергии на возбуждение поверхностных электростатических колебаний и поверхностных геликонов.

Выводы

1. Построена теория взаимодействия магнито-плазменных колебаний с источниками электромагнитного излучения, движущихся вдоль постоянного магнитного поля, изложен метод определения вероятностей процессов излучения и поглощения энергии колебаний частицами и построения кинетических уравнений для магнитоплазменных колебаний.

2. Определены потери энергии заряженной частицы, движущейся с постоянной скоростью вдоль постоянного магнитного поля в плазме твердого тела на возбуждение объемных геликонов. В рамках квантово-механических представлений получено кинетическое уравнение для геликонов, изменение числа которых обусловлено взаимодействием с электронами проводимости. Исследован механизм бесстолкновительного затухания колебаний такого рода, обусловленный их черенковским взаимодействием с зарядами. Определены условия возбуждения геликонов потоком заряженных частиц и получено выражение для инкремента их неустойчивости.

3. Приведены дисперсионные соотношения для по-

верхностных магнитоплазменных волн на границе раздела сред вакуум – полупроводник, показаны условия возникновения, особенности распространения и спектральные характеристики поверхностных геликонов. Исследованы механизмы взаимодействия поверхностных геликонов с источниками электромагнитного излучения (заряженной частицей, магнитным диполем). Определены потери энергии этих источников на их возбуждение и проведен сравнительный анализ эффективности возбуждения объемных и поверхностных геликонов.

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 соединения 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, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 11. – С. 62–69.
7. Кравченко В.И. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 154–161.
8. Кравченко В.И. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 161–169.
9. Кравченко В.И. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплекующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83–89.
10. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89–96.
11. Кравченко В.И. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103.
12. Кравченко В.И. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 103–111.

References (transliterated)

1. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona

v neodnorodnyh poluprovodnikovoyh strukturah. Kiev: Naukova dumka. 1991. 216 p.

2. 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 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 karakteristiki poluprovodnikovoyh komplektujushhijh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. pp. 62–69.

7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jelektromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 154–161.

8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Gen-

eracija jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoy 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 karakteristiki poluprovodnikovoyh komplektujushhijh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 83–89.

10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovoy 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) 13.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Взаємодія магнітоплазмових коливань із джерелами електромагнітного випромінювання / В.І. Кравченко, Л.В. Ваврив, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 38-44. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Взаимодействие магнитоплазменных колебаний с источниками электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, Л.В. Ваврив, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 38-44. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Interaction of Magnetoplasma Oscillations with Sources of Electromagnetic Radiation / V.Kravchenko, L.Vavriv, I. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 38-44. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, директор НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: nii90@email.ua

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: nii90@email.ua

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33, e-mail: nii90@email.ua

Ваврив Людмила Владиславівна – кандидат фізико-математичних наук, с.н.с., НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-63-09, tel. (057) 707-61-33, e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

Ваврив Людмила Владиславовна – кандидат физико-математических наук, с.н.с., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-63-09, tel. (057) 707-61-33, e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

Vavriv Lyudmyla - Candidate of Physico-Matematic Sciences, Senior Researcher, NIPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33, e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

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

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

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@ukr.net

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, Л.В. ВАВРИВ, И.В. ЯКОВЕНКО**ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ВОЛНЫ НА НЕОДНОРОДНОЙ ГРАНИЦЕ ПОЛУПРОВОДНИКА**

Визначено спектр власних електромагнітних коливань неоднорідного плазмового шару, що виникає на межі провідних твердих тіл, малі нерівності яких мають періодичний (статистичний) характер. Показано, що наявність поверхневих електронних станів призводить до появи поверхневих поляритонів, закон дисперсії яких відрізняється від закону дисперсії поляритонів, що розповсюджуються подовж гладкої поверхні плазми. Неоднорідність плазми поблизу поверхні призводить до появи просторової дисперсії поверхневих електростатичних коливань, їх фазова швидкість менше фазової швидкості поляритонів, що розповсюджуються подовж гладкої поверхні напівпровідникової плазми.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, нестійкість, генерування, випромінювання, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

Определен спектр собственных электромагнитных колебаний неоднородного плазменного слоя, возникающего на границе проводящих твердых тел, малые неровности которых имеют периодический (статистический) характер. Показано, что наличие поверхностных электронных состояний приводит к появлению поверхностных поляритонов, закон дисперсии которых отличается от закона дисперсии поляритонов, распространяющихся вдоль гладкой поверхности плазмы. Неоднородность плазмы вблизи поверхности приводит к появлению пространственной дисперсии поверхностных электростатических колебаний, их фазовая скорость меньше фазовой скорости поляритонов, распространяющихся вдоль гладкой поверхности полупроводниковой плазмы.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, неустойчивость, генерация, излучение, заряженные частицы, поверхностные волны.

Spectrum of natural electromagnetic oscillations of heterogeneous plasma layer arising at the boundary of conducting solid bodies, small asperities of those have periodic (statistical) character, was determined. It was shown that presence of surface electronic states causes emergence of surface polaritons that have the dispersion law which is different from the dispersion law of polaritons propagating along smooth plasma surface. Plasma inhomogeneity near the surface causes emergence of spatial dispersion of surface electrostatic oscillations, their phase velocity is less than phase velocity of the polaritons propagating along a smooth surface of semiconductor plasma.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor, instability, generation, radiation, charged particles, surface waves.

Введение. Исследованиям поверхностных электронных состояний посвящено большое количество работ в которых основное внимание уделялось исследованию электронных состояний, возникающих на поверхности кристалла и обусловленных ограниченностью кристаллической решетки или, другими словами, обрывом периодического потенциала. При этом, в зависимости от выбора физической модели различают состояния Тамма, возникающие вследствие изменения хода потенциала на границе кристалл – вакуум, и состояние Шюкли, обусловленное обрывом связей атомов на границе [1].

Однако упомянутые выше две модели не исчерпывают всех задач о поверхностных состояниях. Вызывает интерес иная ситуация, когда частица движется в поле постоянного, а не периодического потенциала, но ее движение ограничено в одном направлении неровной стенкой, представляющей собой бесконечно высокий потенциальный барьер.

Известно, что если стенка гладкая, то поверхностные состояния не возникают. В случае же неровной поверхности стенки вопрос о квантовых поверхностных состояниях изучен недостаточно полно. В настоящей работе исследовались возможности влияния поверхностных электронных состояний, обусловленных наличием малых периодических, либо случайных неровностей границы твердого тела на спектр собст-

венных колебаний полупроводниковых структур. Наличие поверхностных электронных состояний может приводить к появлению неоднородного плазменного слоя.

В работе получены и исследованы дисперсионные характеристики поверхностных колебаний плазмopodobных структур такого рода. Задача решалась в условиях, когда масштабы неровностей малы по сравнению с длинами волн, существующих в структуре. При этом использовался математический аппарат, основанный на представлениях о неровностях поверхности как о малых возмущениях, влияние которых учитывалось в граничных условиях.

Основные результаты. Исследованиям влияния неоднородностей структуры проводящих твердых тел на спектральные характеристики носителей и электромагнитных колебаний уделяется определенный интерес при решении ряда прикладных задач современной радиофизики [2 - 3].

Определим закон дисперсии поверхностных поляритонов в неоднородной плазме образованной поверхностными электронными состояниями на периодически (статистически) неровной границе твердого тела в условиях, когда размеры неоднородностей малы по сравнению с ее периодом

Как показано в работах [2-3], неровности грани-

цы раздела сред приводят к возникновению поверхностных электронных состояний, волновая функция которых имеет вид:

$$\Psi_k = a_0 \exp[-i\delta k_y y + i(k_x x + k_z z - \omega_k t)] \quad (1)$$

Из условия нормировки $\iiint \Psi_k \Psi_k^* dx dy dz = 1$ определяется амплитуда a_0 , $a_0 = \sqrt{\frac{2|\delta|k_y}{S}}$; $S = L_x L_z$; L_x, L_z – размеры образца в направлении X и Z соответственно.

Предположим что в области $y > y_0(x, z)$ создана неоднородная плазма. Такую плазму можно создать, например, путем ионизации примесных атомов, удерживаемых неровной поверхностью диэлектрика или на поверхности полупроводника. Выразим основные параметры такой плазмы через характеристики неровной поверхности. Концентрацию электронов определим $n_0(y)$ следующим образом:

$$n_0(y) = \sum_{k_x, k_z} \Psi_k \Psi_k^* n_k = \frac{2}{S} \sum_{k_x, k_z} n_k [\delta k_y] \exp[-2[\delta k_y] y], \quad (2)$$

где n_k – число электронов в состоянии с волновым вектором k ; суммирование ведется по всем значениям волновых чисел. При этом минимальные значения k определяются размерами образца в направлениях x, z , а максимальные – Ферми импульсом $\hbar k_F$ и параметрами решетки – $q_x q_z$.

Полное число частиц в области $y > 0$ равно $\sum_k n_k$,

$$\text{а поверхностная плотность } n_S = \frac{\sum_k n_k}{S} = \int_0^\infty n_0(y) dy.$$

Приведем значения n_S и $n_0(0)$ для вырожденного электронного газа $n_k = 0, 1$. Если поверхность является периодически неровной только в направлении оси

z ($k_{z \max} = \frac{G_z}{2}, k_{z \min} = \frac{2\pi}{L_z}$), то при $k_F \ll \frac{G_z}{2}$ имеем:

$$n_S = \frac{k_F^2}{4\pi}; \quad n_0(0) = \frac{\zeta_0^2 k_F^2 G_z n_S}{4} \quad (3)$$

при $k_F \gg \frac{G_z}{2}$

$$n_S = \frac{k_F q_z}{2\pi^2}; \quad n_0(0) = \frac{\zeta_0^2 G_z^3 n_S}{12}. \quad (4)$$

Для двумерной периодической неровности при $G_z; G_x \approx G; k_F \ll G$:

$$n_S = \frac{k_F^2}{4\pi}; \quad n_0(0) = \frac{\zeta_0^2 k_F^2 G n_S}{2}. \quad (5)$$

Заметим, что плазма заряженных частиц остается нейтральной т.к. мы предполагаем, что заряд создаваемый электронной концентрацией $n_0(y)$ полностью компенсируется фоном положительно заряженных частиц.

Определим спектр поверхностных электромагнитных колебаний на границе такой плазмы ($y > 0$) и диэлектрика ($y < 0$). Система уравнений, описываю-

щая электромагнитные колебания в плазме, имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{E}_1 &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}_1}{\partial t}; & \text{rot } \vec{H}_1 &= \frac{\varepsilon_0}{c} \frac{\partial \vec{E}_1}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}; \\ \text{div } \vec{E}_1 &= 4\pi n(r, t); & e \frac{\partial n}{\partial t} + \text{div } \vec{j} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $n(r, t)$ – отклонение концентрации электронов от равновесного значения $n_0(y)$; \vec{j} – ток, который в отсутствие пространственной дисперсии среды выражается через векторный потенциал \vec{A} следующим образом:

$$\vec{j} = -\frac{e^2 n_0(y)}{mc} \vec{A}(r, t) \quad (7)$$

(калибровка выбрана таким образом, что $\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$; $\varepsilon_0 = \text{const}$ в диэлектрике и $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(\omega)$ в полупроводнике.

В диэлектрике:

$$\text{rot } \vec{E}_2 = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial t}; \quad \text{rot } \vec{H}_2 = \frac{\varepsilon_2}{c} \frac{\partial \vec{E}_2}{\partial t}. \quad (8)$$

Предположим, что длина электромагнитной волны превосходит высоту и период неровностей поверхности. В этом случае граничные условия для электромагнитных полей такие же, как и на гладкой поверхности, т.е. на плоскости $y=0$ непрерывны тангенциальные составляющие электрических и магнитных полей.

Зависимость всех переменных величин в уравнениях (6) – (8) от координат и времени зададим в виде $A(r, t) = A(y) \exp[i(q_x x - \omega t)]$, где q_x, ω – волновой вектор и частота электромагнитного поля. Вектор \vec{A} имеет компоненты A_x, A_y , а у магнитного поля есть только компонента H_z .

Относительно компоненты H_{z1} система уравнений (6.65) сводится к уравнению:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_1(y) - q_x^2 \right] H_{z1} + \varepsilon_1(y) \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\varepsilon_1(y)} \frac{\partial H_{z1}}{\partial y} \right] &= 0; \\ \varepsilon_1(y) &= \varepsilon_0 - \frac{\omega_0^2(y)}{\omega^2}; \quad \omega_0^2(y) = \frac{4\pi e^2 n_0(y)}{m}. \end{aligned} \quad (9)$$

решение которого ищем в виде:

$$H_{z1}(y) = C_1 \exp \left[-\int_0^y q(y') dy' \right]. \quad (10)$$

Для определения $q(y')$ из (9) получим уравнение:

$$q^2 + \frac{1}{\varepsilon_1(y)} \frac{\partial \varepsilon_1(y)}{\partial y} q + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_1(y) - q_x^2 = 0, \quad (11)$$

если выполняется условие $\frac{1}{q} \frac{dq}{dy} \ll q$. Это условие

означает что относительное изменение глубины проникновения волны в среду $y > 0$, ($\lambda = 1/q$) является малым на расстояниях порядка λ . Из двух решений уравнения выбираем то, которое удовлетворяет условию убывания электромагнитного поля при $y \rightarrow \infty$:

$$q_1 = -\frac{1}{\varepsilon_1(y)} \frac{\partial \varepsilon_1(y)}{\partial y} + \left(q_x^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_1(y) \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

Здесь $q_x^2 > \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_1(y)$ и

$$\left(q_x^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_1(y) \right) > \left(\frac{1}{\varepsilon_1(y)} \frac{\partial \varepsilon_1(y)}{\partial y} \right)^2.$$

Второе неравенство означает, что глубина проникновения электромагнитного поля в плазму меньше области локализации волновой функции электрона:

$$q_1 \approx q_x \gg \left| \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial y} \right|_{\max}.$$

В случае одномерной периодической решетки это условие легко выполняется:

$$\left| \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial y} \right|_{\max} \approx \frac{\varepsilon_0^2 q^3}{8}.$$

Компоненты электрического поля в плазме легко выражаются через компоненту H_{z1} следующим образом:

$$E_{x1} = i \frac{q_1 c}{\omega \varepsilon_1(y)} H_{z1}. \tag{13}$$

В диэлектрике:

$$H_{x2} = C_2 \exp(q_2 y); \quad E_{x2} = -i \frac{q_2 c}{\omega \varepsilon_2} H_{z2}, \tag{14}$$

где:

$$q_2 = \left(q_x^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_2 \right)^{\frac{1}{2}} > 0.$$

Из граничных условий на плоскости $y = 0$ следует:

$$q_1(0) = -q_2 \frac{\varepsilon_1(0)}{\varepsilon_2}. \tag{15}$$

Это равенство выполняется, если $\varepsilon_1(0) < 0$. Подставляя в (15) значения q_1 ; q_2 , получим дисперсионное уравнение для поперечных поверхностных электромагнитных волн (поверхностных поляритонов):

$$q_x^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\varepsilon_1(0) \varepsilon_2}{\varepsilon_1(0) + \varepsilon_2} - \frac{\varepsilon_1'(0) \varepsilon_2^2 \left(q_x^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_1(0) \right)^{\frac{1}{2}}}{\varepsilon_1(0) [\varepsilon_1^2(0) - \varepsilon_2^2]}; \tag{16}$$

$$\varepsilon_1'(0) = \left. \frac{4\pi e^2}{m \omega^2} \frac{\partial n_0(y)}{\partial y} \right|_{y=0}.$$

Уравнение (15) решаем относительно q_x методом последовательных приближений по малому параметру

$$\frac{\varepsilon_1'(0)}{q_x \varepsilon_1(0)} \ll 1.$$

В результате получим:

$$q_x = q_{x0} + \delta q_x. \tag{17}$$

$$q_{x0}^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\varepsilon_1(0) \varepsilon_2}{\varepsilon_1(0) + \varepsilon_2}; \quad \delta q_{x0} = \frac{\varepsilon_1'(0) \varepsilon_2^{\frac{3}{2}}}{2[\varepsilon_1(0)]^{\frac{1}{2}} [\varepsilon_1^2(0) - \varepsilon_2^2]}.$$

Величина δq_x положительна, т.к. значение $\varepsilon_1'(0)$ всегда положительно.

Действительно:

$$\varepsilon_1'(0) = \frac{16\pi e^2}{m \omega^2 S} \sum_{k_x, k_z} n_k \left| \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial y} \right|^2 > 0.$$

Например, в случае неровной границы периодической в одном направлении:

$$\varepsilon_1'(0) = \frac{e^2}{m \omega^2} \frac{\varepsilon_0^4 k_F^2 G_z^4}{4}; \quad k_F \ll \frac{G_z}{2}.$$

Таким образом, наличие поверхностных электронных состояний приводит к появлению поверхностных поляритонов, закон дисперсии которых отличается от закона дисперсии поляритонов, распространяющихся вдоль гладкой поверхности однородной плазмы. Фазовая скорость полученных волн меньше в результате зависимости концентрации электронов от нормальной координаты.

Для электростатических колебаний ($c \rightarrow \infty$) из (16) следует соотношение:

$$\varepsilon_1(0) + \varepsilon_2 = - \frac{\varepsilon_1'(0) \varepsilon_2^2}{\varepsilon_1(0) [\varepsilon_1(0) - \varepsilon_2] q_x}. \tag{18}$$

В этом случае:

$$\omega = \omega' + \delta \omega; \quad \omega'^2 = \frac{\omega_0^2}{\varepsilon_0 + \varepsilon_2}; \quad \delta \omega = - \frac{\omega' \varepsilon_1'(0)}{4 q_x}. \tag{19}$$

т.е. возникает дисперсия частоты, а групповая скорость волны – положительна.

Заметим, что формулы (18)–(19) применимы и в случае, когда система состоит из полупроводника и диэлектрика. При этом ε_0 обладает частотной дисперсией. В однородной плазме с неровной поверхностью изменение частоты поверхностного плазмона зависит от параметров решетки и не содержит волновых чисел; при этом масштабы неровностей иные (длина волны порядка периода неровностей).

Аналогичные результаты можно получить, если граница раздела сред имеет случайные неровности. В этом случае форма границы описывается случайной функцией координат $y_0 = \zeta(x, y) = \zeta(r)$ относительно свойств которой предполагаем следующее: $\zeta(r)$ – однозначная и достаточно гладкая функция, т.е. дифференцируемая необходимое число раз по всем аргументам. При этом $\frac{\partial \zeta}{\partial x} \ll 1$; $\frac{\partial \zeta}{\partial y} \ll 1$ (неровности пологие).

При решении уравнения Шредингера с граничным условием используется стандартная процедура определения поля над статистически неровной поверхностью. Соотношение, определяющее спектр электронных состояний, приведены в предыдущем параграфе настоящего раздела.

При определении закона дисперсии поверхностных поляритонов, распространяющихся вдоль статистически неровной поверхности можно воспользоваться формулами (9) – (16).

При $k_F l \ll 1$; (l – корреляционная длина) получим:

$$n_s = \frac{k_F^2}{4\pi}; \quad \left. \frac{\partial n_0}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{\pi \varepsilon_0^4 k_F^4 n_s}{12 l^2}; \quad n_0(0) = \frac{\sqrt{\pi} \varepsilon_0^2 k_F^2 n_s}{2 l \sqrt{2}}.$$

Таким образом, на границе твердого тела с регулярными или случайными неровностями, представляющими собой малые возмущения поверхности, можно создать неоднородную плазму, параметры которой определяются свойствами поверхности (высотой, периодом неровностей). На границе такой плазмы

с диэлектриком в области частот меньше ленгмюровской распространяются поверхностные электромагнитные волны, фазовая скорость которых определяется величиной электронной концентрации на границе раздела сред. Неоднородность плазмы приводит к дисперсии частоты, когда эффектом запаздывания можно пренебречь. Групповая скорость такой волны положительна, а ее величина определяется характером убывания электронной концентрации от границы.

Выводы

1. Полученные выше результаты указывают на то, что неровности границы раздела двух сред приводят к возникновению поверхностных электронных состояний, волновая функция которых экспоненциально убывает с расстоянием при удалении от границы.

2. Экспериментальное наблюдение указанных эффектов может быть осуществлено, например, на границе полупроводник-диэлектрик. Граница может иметь естественную шероховатость или периодическую структуру в виде дислокаций несоответствия, или же можно создать искусственный периодический рельеф. Согласно полученным результатам, электроны будут локализовываться вблизи границы в слое толщиной R , поскольку $\Psi \sim e^{-y/R}$. Если взять период поверхности $a = 10^{-5}$ см, величине, доступной при литографическом способе изготовления структуры, а соотношение между амплитудой неровностей ζ_0 и длиной волны ($\lambda = 1/k$) $\zeta_0 k \approx 0,1$, то электроны будут локализовываться в слое толщиной $R \approx 10^{-4}$ см в резонансном случае, а в длинноволновом пределе в слое, толщиной на порядок больше.

3. Следует отметить, что в предельных случаях – длинноволновом и коротковолновом – R имеет одинаковые порядки величин как для периодической поверхности, так и для случайной. В этих предельных случаях свойства поверхности слабо проявляются на длине волны. Наиболее эффективное взаимодействие возникает, когда длина волны де Бройля электрона сравнима с характерным размером неоднородности и выполняется условие отражения Брэгга.

4. Определен спектр собственных электромагнитных колебаний неоднородного плазменного слоя, возникающего на границе проводящих твердых тел, малые неровности которых имеют периодический (статистический) характер. Показано, что наличие поверхностных электронных состояний приводит к появлению поверхностных поляритонов, закон дисперсии которых отличается от закона дисперсии поляритонов, распространяющихся вдоль гладкой поверхности плазмы. Неоднородность плазмы вблизи поверхности приводит к появлению пространственной дисперсии поверхностных электростатических колебаний, их фазовая скорость меньше фазовой скорости поляритонов, распространяющихся вдоль гладкой поверхности полупроводниковой плазмы.

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 электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83–89.

10. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89–96.

11. Кравченко В.И. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103.

12. Кравченко В.И. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 103–111.

References (transliterated)

1. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovovyh strukturah. Kiev: Naukova dumka. 1991. 216 p.

2. 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 poluprovodnikovovyh priborov. Moscow: Mir. 1984. 456 p.

6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo izluchenija

na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovoyh kompleksujushhijh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. pp. 62–69.

7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jelektromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 154–161.

8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnogo jelektromagnitnogo vozdejstvija. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. pp. 161–169.

9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vneshnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovoyh kompleksujushhijh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 83–89.

10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 89–96.

11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovoyh struktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 96–103.

12. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovoyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 103–111.

Поступила (received) 27.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Поверхневі плазмові хвилі на неоднорідній межі напівпровідника / В.І. Кравченко, Л.В. Ваврив, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 45-49. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Поверхностные плазменные волны на неоднородной границе полупроводника / В.И. Кравченко, Л.В. Ваврив, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 45-49. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Surface Plasma Waves at Heterogeneous Boundary of Semiconductor / V.Kravchenko, L.Vavriv, I. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 45-49. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, директор НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: nii90@email.ua

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-61-33, e-mail: nii90@email.ua

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33, e-mail: nii90@email.ua

Ваврив Людмила Владиславівна – кандидат фізико-математичних наук, с.н.с., НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-63-09, tel. (057) 707-61-33, e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

Ваврив Людмила Владиславовна – кандидат физико-математических наук, с.н.с., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-63-09, tel. (057) 707-61-33, e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

Vavriv Lyudmyla - Candidate of Physico-Matematic Sciences, Senior Researcher, NIPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel. (057) 707-61-33, e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

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

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

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@ukr.net

УДК 537.52:542.9:661.66

Н. И. КУСКОВА, Д. И. ЧЕЛПАНОВ, А. Н. КОРЗИНОВА**САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ
МЕТАЛЛОУГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ**

Реализовано процесси високотемпературного синтезу (СВС) металовуглецевих наноматеріалів у хвилі горіння, яку ініціює разрядноімпульсний струм. Обрана екзотермічна система «алюміній + титан + політетрафторетилен» для СВС карбіду титану у процесі протікання сполучених екзотермічних реакцій з утворенням наноструктурного порошку карбіду титану. Обрана екзотермічна система «вольфрам + титан + вуглець» для отримання нанорозмірних карбідів вольфраму і титану, в якій в якості джерела вуглецю використовуються порошки вуглецевих наноматеріалів, синтезовані методом електророзрядної обробки вуглеводнів.

Ключові слова: самопоширюваний високотемпературний синтез, разрядноімпульсне ініціювання, карбід титану, карбід вольфраму, вуглецевий нанокристалічний матеріал.

Реализованы процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) металлоуглеродных наноматериалов в волне горения, инициируемой разрядноимпульсным током. Выбрана экзотермическая система «алюминий + титан + политетрафторэтилен» для СВС карбида титана в процессе протекания сопряженных экзотермических реакций с образованием наноструктурного порошка карбида титана. Выбрана экзотермическая система «вольфрам + титан + углерод» для получения наноразмерных карбидов вольфрама и титана, в которой в качестве источника углерода используются порошки углеродных наноматериалов, синтезированные методом электроразрядной обработки углеводородов.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, разрядноимпульсное инициирование, карбид титана, карбид вольфрама, углеродный нанокристаллический материал.

Processes of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) of metal-carbon nanomaterials in a combustion wave initiated by a pulse discharge current are realized. Exothermic systems for SHS of metallocarbon nanomaterials are chosen. Powder mixture "aluminum + titanium + polytetrafluoroethylene" is proposed to use for SHS of titanium carbide via series of conjugated exothermic reactions. It is shown that nanostructured titanium carbide powder with nanocrystallites' size of 35 nm is formed as a result of combustion of the mixture. Carbon nanomaterial powders which were synthesized by the electrodischarge processing of hydrocarbons are used to synthesize carbides of tungsten and titanium in the "tungsten + titanium + carbon" system with nanocrystallites' size of 48.8 nm for TiC, 46 nm for W₂C and 20.7 nm for WC.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, pulse discharge initiation, titanium carbide, tungsten carbide, carbon nanocrystalline material.

Введение

Значительный интерес научного сообщества к исследованию способов получения, структуры и свойств наноразмерных систем обусловлен многообразием вариантов их практического применения. Малый размер структурных составляющих (до 100 нм) определяет значительные различия в свойствах наноматериалов по сравнению с их макроаналогами [1-3].

Развитие промышленности требует новых подходов к созданию технологий, в которых активно синтезируются и применяются новые металлоуглеродные наноматериалы. Высокая востребованность металлоуглеродных наноматериалов обуславливается разнообразием их физико-химических свойств и значительным потенциалом в направлении улучшения их потребительских характеристик.

Одной из проблем в производстве металлоуглеродных наноматериалов является получение различных углеродных добавок, способных заменить дорогостоящий углерод. Так, в качестве углеродного компонента при синтезе материалов по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) используют различные виды сажи, графитовый порошок. Активная форма углеродной добавки и ее равномерное распределение по объему шихтовой СВС-смеси – необходимые условия для получения

качественного продукта. Поэтому поиск новых перспективных заменителей углерода для получения металлоуглеродных наноматериалов остается актуальным.

Одной из наиболее активных форм углерода является углеродный нанокристаллический материал (УНМ). Наноструктурированные модификации углерода, относящиеся к сравнительно недавно открытым классам веществ, находят все более широкое применение в различных направлениях химической промышленности, индустрии конструкционных и строительных материалов, системах обеспечения безопасности, электроники, медицины. УНМ могут быть использованы и для получения металлоуглеродных наноматериалов в СВС-процессах.

Технологические достоинства СВС заложены в самом принципе – использование быстро выделяющегося тепла химических реакций вместо нагрева вещества от внешнего источника, поэтому многие СВС-процессы даже в простейшем варианте успешно конкурируют с традиционными энергоемкими технологиями. Однако по мере развития метода и технологий СВС к ним предъявляются все более сложные требования с целью получения максимального эффекта.

В настоящее время в области СВС ведутся перспективные работы по синтезу нанопорошков и наноматериалов, прямому синтезу монокристаллов, полу-

чению керамических и металлокерамических пеноматериалов, созданию композиционных материалов типа полимер-керамика, синтезу сверхтвердых материалов.

Закономерности и механизм СВС наиболее удобно исследовать на примере горения самых простых экзотермических систем, состоящих из одних химических элементов (безгазовые системы). Для безгазовых систем исходные компоненты, промежуточные и конечные продукты находятся в конденсированном состоянии, то есть отсутствуют газообразные продукты сгорания, поэтому скорость горения не зависит от внешнего давления.

Известно, что метод СВС является энергосберегающим и высокопроизводительным способом получения качественных порошков карбидов. При использовании в твердых сплавах порошков карбидов с ультрадисперсной и нанокристаллической структурой можно существенно увеличить твердость, прочность и вязкость сплава.

Анализ предварительных исследований и литературы

Широкое применение для получения ценных в практическом отношении композитов металлов [4], карбидов [5], боридов [6], нитридов, оксидов и гидридов [7] нашел самораспространяющийся высокотемпературный синтез. СВС-метод основан на

химических реакциях, протекающих внутри узкой высокотемпературной зоны (от 1000 до 4000 К), которая распространяется в исходной системе порошков, состоящей из мелкодисперсной фракции окислителя и восстановителя [8].

Экспериментально установлено, что СВС относится к трудно иницируемым процессам горения. Температура и энергия зажигания этих систем превосходят таковые для известных конденсированных взрывчатых веществ и порохов.

После иницирования и некоторого переходного периода устанавливается определенный режим распространения реакции. В большинстве случаев этот режим, характеризующийся постоянством линейной скорости перемещения фронта, близкий к стационарному. Интервал изменения скоростей горения для разных систем составляет от долей миллиметра в секунду (медленногорящие) до десятков сантиметров в секунду (быстрогорящие).

Размер частиц в продуктах СВС составляет обычно от 1 до 5 мкм, поэтому предполагалось, что получить этим методом вещества в нанокристаллическом состоянии нельзя. В 2002 г. было предложено осуществлять синтез нанопорошков карбида титана в результате использования инертного разбавителя, предотвращающего рост образующихся частиц карбида вследствие образования тонкого слоя расплава соли. Синтезированный с использованием в качестве разбавителя NaCl (при оптимальном содержании массовой доли ~ 30 %) порошок карбида имеет средний размер частиц ~ 100 нм. Недостатком метода является необходимость отмывания NaCl [9, 10].

Традиционная технология СВС карбида титана основана на нефльтрационном сжигании шихты -

исходной смеси порошков титана и сажи - в насыпном виде или в виде прессованных брикетов (таблеток) в замкнутом реакторе, в результате чего происходит значительный рост давления в реакторе и получается сильно спеченная прочная масса карбида титана. Такой спеченный продукт горения трудно поддается дроблению и размолу в порошок, особенно в порошок высокой дисперсности.

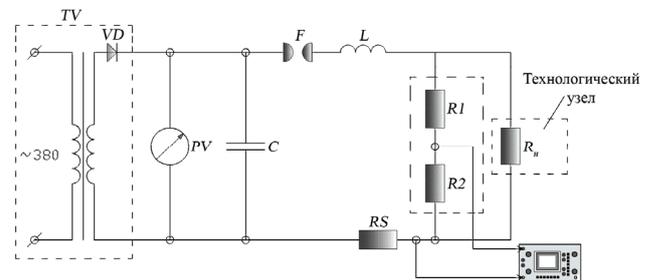
Для получения высокодисперсного порошка карбида титана применяют способ получения тугоплавких соединений на основе процесса СВС с фильтрацией газов и использованием гранулированной шихты. Это позволяет значительно снизить давление в реакторе, сделать процесс СВС более безопасным и получить высокопористый слабоспеченный продукт, который легко размалывается в микропорошок.

Кроме того, для увеличения дисперсности синтезируемого порошка карбида титана до наноразмерного используют различные специальные добавки в шихту, которые предотвращают рост синтезируемых карбидных частиц.

Цель работы – целенаправленное получение металлоуглеродных наноматериалов в результате разрядноимпульсного иницирования СВС в экзотермических системах, содержащих наноразмерные реагенты.

Методика исследований

Для исследования процесса разрядноимпульсной инициации СВС нами был применен соответствующий электроразрядный контур (рис. 1) [11].



TV – высоковольтный трансформатор с выпрямителем *VD*; *PV* – киловольтметр; *C* – батарея конденсаторов; *F* – управляемый воздушный разрядник; *L* – катушка индуктивности; *RS* – измерительный шунт; *R1, R2* – делитель напряжения; *R_n* – иницирующая проволока

Рисунок 1 – Электроразрядный контур для иницирования СВС

Подготовленную из порошковых реагентов шихту (спрессованную до определенной плотности или помещенную в капсулу, внутренний диаметр которой от 3 до 30 мм и больше) располагают в технологическом узле в специальной ячейке.

К торцу образца подводят иницирующую проволоку в виде спирали, предварительно закрепленной в токоведущих электродах.

Для нагрева экзотермических смесей была использована вольфрамовая проволока радиусом 0,3 мм.

Иницирование волны горения реализуется кратковременным импульсом тока (локальный нагрев экзотермической смеси разрядным импульсом тока, текущего по проволоке) [12].

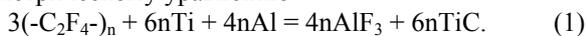
Для реализации процесса СВС порошки металлов с размером частиц менее 50 мкм и углеродсодержащие вещества или УНМ смешивали до однородного состояния.

УНМ получали методом разрядноимпульсной обработки керосина (ТС-1). Порошковые смеси засыпали в кварцевые или политетрафторэтиленовые трубки.

Эксперименты проводили в нормальных условиях при атмосферном давлении

Для реализации СВС карбида титана в качестве источника углерода нами была выбрана экзотермическая система порошковых реагентов алюминий + политетрафторэтилен ($Al + (-C_2F_4)_n$).

Нами предложен метод СВС карбида титана в сопряженных экзотермических реакциях в системе « $Al + Ti + (-C_2F_4)_n$ ». Порошковую смесь для СВС готовили с учетом соотношения реагентов согласно стехиометрическому уравнению



Предполагалось, что в момент инициации процесса СВС политетрафторэтилен вступает в экзотермическую реакцию с алюминием с образованием нанокластеров углерода, которые впоследствии вступают в последующую реакцию с титаном с образованием карбида титана. Образующийся побочный продукт (фторид алюминия) в дальнейшем удалялся растворением СВС продукта в плавиковой кислоте.

По нашим сведениям, к настоящему моменту синтез карбида вольфрама методом СВС по реакции $W + C = WC$ не реализуется из-за термодинамических ограничений. Поэтому применяют модифицированные методы СВС карбида вольфрама с добавлением в порошковую систему дополнительных реагентов для реализации экзотермического горения смеси.

Реализацию экзотермического СВС-горения порошковых смесей « $W + C$ » достигали добавлением порошков титана (от 20 до 50 мас. %) и политетрафторэтилена (5 мас. %) в исходную порошковую смесь. С целью получения наноразмерной фракции результирующих порошков карбидов, был использован источник углерода соответствующей размерности – синтезированные электроразрядной обработкой углеводородов порошки УНМ.

Образцы для реализации СВС готовили из смеси порошков соотношением реагентов, соответствующим стехиометрическому уравнению химической реакции $kW + mTi + C = kW C + mTiC, k+m = 1. \quad (2)$

Рентгенофазовый анализ полученных металлоуглеродных наноматериалов выполнен в Институте металлофизики НАН Украины.

Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) нанокристаллов синтезированных фаз определяли по формуле Шеррера [13]

$$d = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos\left(\frac{2\theta}{2}\right)}, \quad (3)$$

где d – диаметр наночастицы, нм; β – ширина рентгеновского максимума на полувысоте, рад.; λ – длина волны рентгеновского излучения, нм; k – константа Шеррера, безразм.

Результаты эксперимента

Плотности подготовленных порошковых смесей, при которых происходит зажигание СВС металлоуглеродных наноматериалов, составляют от 1500 до 2000 кг/м³.

При введенной в иницирующей проводник мощности менее 0,1 МДж/(м²·с) волна горения не образуется. Зажигание СВС в этом случае реализовали при нагревании порошковой смеси до температуры 500 К или при использовании экзотермической добавки (политетрафторэтилена).

Системы металл - углерод характеризуются широкими областями гомогенности фаз карбида, а также наличием относительно низкотемпературных эвтектик. Адиабатическая температура горения равна температуре плавления карбида титана и превышает температуры плавления металлов. Таким образом, в волне горения процесс реагирования идет через растворение углерода в расплаве металла с кристаллизацией фазы карбида из расплава, т. е. первой образующейся фазой твердого продукта является монокарбид.

Согласно (1), реализация СВС карбида титана представляет собой процесс протекания двух сопряженных экзотермических реакций – синтеза углерода и карбида титана. Сначала происходит плавление алюминия, затем протекает экзотермическая реакция образования фторида алюминия с одновременным синтезом аморфного углерода. Далее нанокластеры углерода реагируют с титаном и образуется карбид титана.

Результаты рентгенофазового анализа показали, что исходные порошки металлов и политетрафторэтилена вступили в СВС-реакцию, продуктами которой является порошковая смесь карбида титана и фторида алюминия (рис. 2).

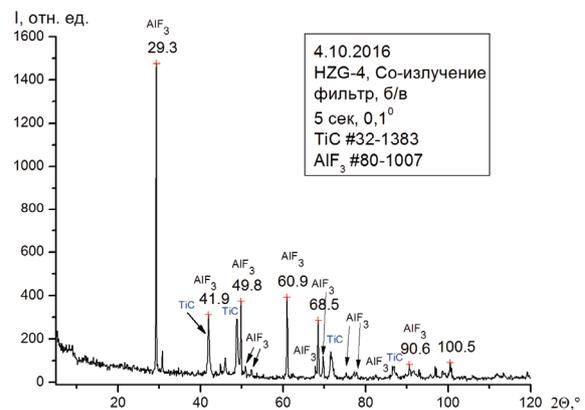


Рисунок 2 – Дифрактограмма СВС-продукта системы « $Al + Ti + (-C_2F_4)_n$ »

Карбид титана имеет кубическую форму (пространственная группа $Fm-3m$). По дифрактограмме рассчитаны ОКР, значения которых позволяют оценить размеры нанокристаллитов карбида титана $d \approx 35$ нм. Максимум пика, на основании которого рассчитывали ОКР - 48,8°.

Таким образом, в процессе горения смеси «алюминий + титан + политетрафторэтилен» происходит синтез наноструктурного порошка карбида титана.

Удаление побочного вещества (фторида алюми-

ния) осуществляется при растворении СВС-продукта в плавиковой кислоте или при нагревании порошка в вакууме до температуры возгонки фторида алюминия (1580 К). Нагревание порошка позволяет удалить также свободный углерод, содержание которого в СВС-продукте менее 10 %.

Температура плавления СВС карбида титана совпадает с измеренной температурой горения 3370 К.

Реализацию СВС карбидов тугоплавких металлов проводили в системе «вольфрам + титан + УНМ». Состав компонентов смеси выбирали в соответствии со стехиометрическими соотношениями уравнения (3):

$$1) k = m = 0,5 (W : Ti : C = 0,5 : 0,5 : 1);$$

$$2) k = 0,8; m = 0,2 (W : Ti : C = 0,8 : 0,2 : 1).$$

Результаты рентгенофазового анализа показали, что исходные порошки металлов и нанокристаллического углерода вступили в СВС-реакцию и образовали смеси карбидов титана и вольфрама: TiC, WC и W₂C (рис. 3).

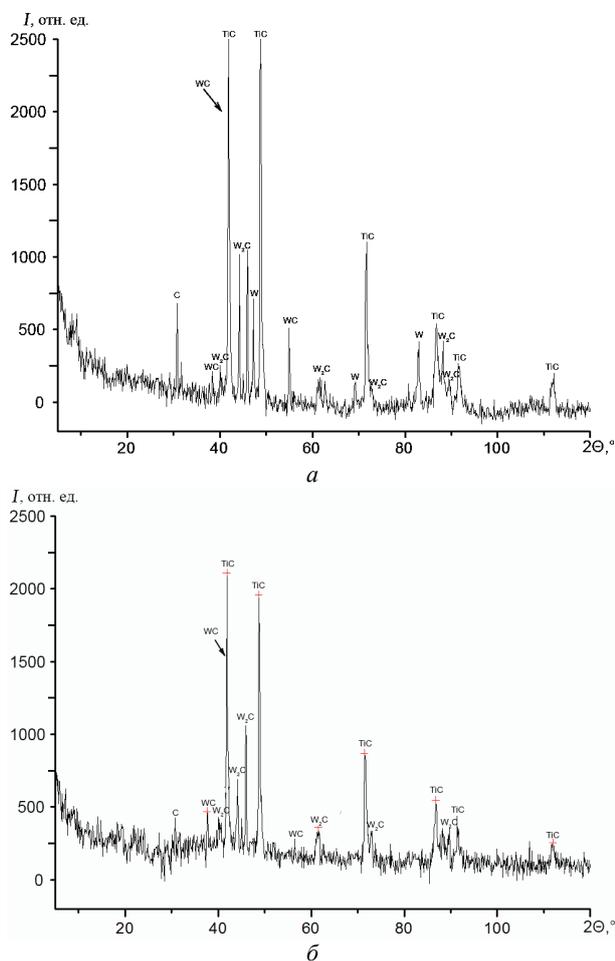


Рисунок 3 – Дифрактограммы СВС-продуктов системы «W + Ti + C» для составов исходной смеси:

a – W : Ti : C = 0,5 : 0,5 : 1; б – W : Ti : C = 0,8 : 0,2 : 1

Синтез кристаллитов W₂C гексагональной формы (пространственная группа P-3m1) происходит благодаря взаимодействию вольфрама с углеродом при температурах от 3300 до 3500 К [14].

Адиабатическая температура горения системы «титан+углерод» близка к температуре плавления карбида титана и превышает температуру плавления титана. Таким образом, реакция протекает путем растворения уг-

лерода в расплаве металла с кристаллизацией фазы карбида титана из расплава [15]. Теплота реакции образования карбида титана (~225 Дж/моль) расходуется на поддержание реакции синтеза карбида вольфрама.

Наличие остаточного углерода и вольфрама (рис. 3, а) может быть связано с нарушением стехиометрического соотношения между компонентами порошковой смеси ввиду образования карбида W₂C, которое не учитывалось в предполагаемой химической реакции (3).

Увеличение количества вольфрама в смеси приводит к уменьшению остаточного углерода и вольфрама в СВС-продукте и, соответственно, к увеличению содержания карбида WC гексагональной формы (пространственная группа P-6m2) (рис. 3).

По дифрактограммам для продуктов СВС: WC, W₂C и TiC рассчитаны размеры кристаллитов. Максимумы пиков, на основании которых рассчитывали ОКР: 48,8° для TiC, 46,1° для W₂C, 35° и 48° для WC. Получены следующие значения размеров наночастиц: для карбида титана – 48,8 нм, для W₂C – 46 нм, для WC – 20,7 нм.

Использование УНМ, синтезированных в процессе электроразрядной обработки углеводородов [16], позволяет получать наноструктурные порошки карбидов вольфрама и титана без использования механохимической обработки исходной смеси.

Синтезированный СВС-продукт представляет собой спекшийся порошок серого цвета с металлическим отблеском с насыпной плотностью 103 кг/м³.

Удельная электрическая проводимость смеси синтезированных карбидов равна 4·10³ См/м при плотности 2·10³ кг/м³.

Выводы

Выбраны экзотермические системы для синтеза металлоуглеродных наноматериалов.

Экспериментально исследованы условия разрядно-импульсного инициирования СВС-процессов: мощность зажигания СВС разрядными импульсами тока на единицу площади поверхности образца – от 0,1 до 1 МДж/(м²·с), плотности подготовленных порошковых смесей, при которых происходит зажигание СВС, составляют от 1500 до 2000 кг/м³.

Для синтеза карбидов предложено использовать углеродные наноматериалы, синтезированные методом электроразрядной обработки углеводородов.

Предложено использовать порошковую смесь «алюминий + титан + политетрафторэтилен» для СВС карбидов в процессе протекания сопряженных экзотермических реакций. В результате горения смеси «алюминий + титан + политетрафторэтилен» происходит образование наноструктурного порошка карбида титана (размер ОКР нанокристаллитов, рассчитанный по дифрактограмме, – 35 нм).

Реализацию СВС карбидов тугоплавких металлов проводили в системе «вольфрам + титан + УНМ». Показано, что увеличение содержания вольфрама в смеси от 50 % до 80 % приводит к уменьшению непрореагировавшего углерода и вольфрама и, соответственно, к увеличению содержания карбида WC в СВС-продукте.

По дифрактограммам рассчитаны размеры ОКР кристаллитов: TiC – 48,8 нм, W₂C – 46 нм и WC –

20,7 нм. Использование углеродных наноматериалов позволяет получать наноструктурные порошки карбидов вольфрама и титана без предварительной механической обработки исходной смеси.

Список литературы:

1. Drexler K. E. Nanosystems: molecular machinery, manufacturing and computation / K. E. Drexler. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
2. Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения / Под ред. П. П. Мальцева. – М.: Техносфера, 2008.
3. Smith W. F. Foundations of materials science and engineering / W. F. Smith, J. Hashemi. – 5th Edition McGraw-Hill, 2010. – 1056 p.
4. Garret W. Die castable Aluminum Metal Matrix Composites by Self-propagating High-temperature Synthesis / W. Garret, J. Nuechterlein, I. Jo, A. Munitz, M. J. Kaufman and J. J. Moore // Society of Die Casting Engineers. – 2012. – Vol. 55. – P. 71-78.
5. Garret W. Control of Self-propagating High-temperature Synthesis Derived Aluminum-Titanium Carbide Metal Matrix Composites, Golden: PhD thesis / W. Garret. – Colorado School of Mines. – 2012. – P. 160-170.
6. Абдулкаримова Д. С. Получение боридных композиций методом СВС / Д. С. Абдулкаримова, И. М. Вонгай, З. А. Мансуров, О. Одавара // Межд. симпозиум «Физика и химия углеродных материалов / Наноинженерия», Алматы. – 2010. – С. 116-118.
7. Varma A. Combustion synthesis of advanced materials: principles and applications / A. Varma, A. Rogachev, A. Mukasyan, et al. // Advanced Chemical Engineering. – 1998. – Vol. 24. – P. 78-226.
8. Bystrzejewski M. Self-sustaining high-temperature synthesis of carbon-encapsulated magnetic nanoparticles from organic and inorganic metal precursors / M. Bystrzejewski, M. Szala, W. Kicinski, W. Kaszuwara, M.H. Rummeli, T. Gemming, A. Huczko // New Carbon Materials. – Apr., 2010. – Vol. 25. – № 2. – P. 81-88.
9. Мержанов А. Г. Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов / А. Г. Мержанов // Успехи химии. – 2003. – Т. 72, № 4. – С. 323-412.
10. Ремпель А. А. Нанотехнологии, свойства и применение наноструктурированных материалов / А. А. Ремпель // Успехи химии. – 2007. – Т. 76, № 5. – С. 474-499.
11. Челпанов Д. И. Пат. 104443, Украина Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів / Д. І. Челпанов, Н. І. Кускова, А. О. Смально. – 2016.
12. Челпанов Д. И. Условия разрядноимпульсного инициирования и параметры процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза углеродных наноматериалов / Д. И. Челпанов, В. Ю. Бакларь, Н. И. Кускова, А. Н. Корзинова // Вісник НТУ «ХП». Сер. Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. праць. – 2016. – № 51. – С. 115-120.
13. Альмяшева О. В. Размер, морфология и структура частиц нанопорошка диоксида циркония, полученного в гидротермальных условиях / О. В. Альмяшева, Б. А. Федорова, А. В. Смирнов, В. В. Гусаров // Наносистемы: Физика, Химия, Математика. – 2010. – Т. 1, № 1. – С. 26 - 36.
14. Huczko A. Combustion synthesis as a novel method for production of 1-D SiC nanostructures / A. Huczko, M. Bystrzejewski, H. Lange, et al. // Journal of Physical Chemistry B. – 2005. – Vol. 109. – P. 16244-16251.
15. Huczko A. A self-assembly SHS approach to form silicon carbide nanofibers / A. Huczko, M. Osica, A. Rutkowska, et al. // Journal of Physics: Condensed Matter. –

2007. – Vol. 19. – P. 395022.

16. Нажибкизы М. Получение супергидрофобной углеродной поверхности при горении пропана / М. Нажибкизы, З. А. Мансуров, И. К. Пури, Т. А. Шабанова, И. А. Цыганова. – Нефть и газ. – 2010 – №5(59). – С. 27-33.

References (transliterated):

1. Drexler K. E. Nanosystems: molecular machinery, manufacturing and computation. N. Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1992. 576 p.
2. Mal'cev P. P., ed. Nanotehnologii. Nanomaterialy. Nanosistemnaja tehnika. Mirovye dostizhenija [Nanotechnologies. Nanomaterials. Nano-system engineering. World achievements]. – Moscow, Tehnosfera Publ., 2008.
3. Smith W. F. Foundations of materials science and engineering. 5th Edition McGraw-Hill, 2010. 1056 p.
4. Garret W., Nuechterlein J., Jo I., Munitz A., Kaufman M. J. and Moore J. J. Die castable Aluminum Metal Matrix Composites by Self-propagating High-temperature Synthesis. Society of Die Casting Engineers. 2012. Vol. 55. P. 71-78.
5. Garret W. Control of Self-propagating High-temperature Synthesis Derived Aluminum-Titanium Carbide Metal Matrix Composites, Golden. PhD thesis. Colorado School of Mines, 2012. P. 160-170.
6. Abdulkarimova D. S., Vongaj I. M., Mansurov Z. A., Odavara O. Poluchenie boridnyh kompozitov metodom SVS [Production of boride composites by the SHS method]. Mezhd. simpozium «Fizika i himija uglevodnyh materialov/Nanoinzhenerija». Almaty, 2010. P. 116-118.
7. Varma A., Rogachev A., Mukasyan A., et al. Combustion synthesis of advanced materials: principles and applications. Advanced Chemical Engineering. 1998. Vol. 24. P. 78-226.
8. Bystrzejewski M., Szala M., Kicinski W., Kaszuwara W., Rummeli M.H., Gemming T., Huczko A. Self-sustaining high-temperature synthesis of carbon-encapsulated magnetic nanoparticles from organic and inorganic metal precursors. New Carbon Materials. Apr., 2010. Vol. 25, no. 2. P. 81-88.
9. Merzhanov A. G. Protsessy gorenija i vzryva v fizikokhimii i tekhnologii neorganicheskikh materialov [Combustion and explosion processes in physicochemistry and technology of inorganic materials]. Uspekhi khimii. 2003. Vol. 72, no. 4. P. 323-412.
10. Rempel' A. A. Nanotekhnologii, svoystva i primenenie nanostrukturirovannykh materialov [Nanotechnologies, properties and applications of nanostructured materials]. Uspekhi khimii. 2007. Vol. 76, no. 5. P. 474-499.
11. Chelpanov D. I., Kuskova N.I., Smal'ko A. O. Sposib oderzhannya vugletsevikh nanomaterialiv [Method of carbon nanomaterials production]. Patent UA, no. 104443, 2016.
12. Chelpanov D. I., Baklar' V. Yu., Kuskova N. I., Korzinova A. N. Usloviya razryadnoimpul'snogo initsiirovaniya i parametry protsessa samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza uglevodnykh nanomaterialov [Conditions for the pulse discharge initiation and parameters of the process of self-propagating high-temperature synthesis of carbon nanomaterials]. Visnik NTU «KhPI». Ser. Tekhnika ta elektrofizika visokikh naprug: zb. nauk. prats'. 2016. No. 51. P. 115-120.
13. Al'myasheva O. V., Fedorova B. A., Smirnov A. V., Gusarov V. V. Razmer, morfologiya i struktura chastits nanoporoshka dioksida tsirkoniya, poluchennogo v gidrotermal'nykh usloviyakh [Size, morphology and structure of zirconia nanopowder particles obtained under hydrothermal conditions]. Nanosistemy: Fizika, Khimiya, Matematika. 2010. Vol. 1, no. 1. P. 26-36.
14. Huczko A., Bystrzejewski M., Lange H., et al. Combustion synthesis as a novel method for production of 1-D SiC nanostructures. Journal of Physical Chemistry B. 2005. Vol. 109. P. 16244-16251.
15. Huczko A., Osica M., Rutkowska A., et al. A self-

assembly SHS approach to form silicon carbide nanofibers. Journal of Physics: Condensed Matter. 2007, Vol. 19. P. 395022.

16. Nazhipkyzy M, Mansurov Z. A., Puri I. K., Shabanova T. A., Cyganova I. A. Poluchenie supergidrofobnoj

uglerodnoj poverhnosti pri gorenii propane [Preparation of superhydrophobic carbon surface during propane combustion]. Neft' i gaz. 2010. No. 5(59). P. 27-33.

Поступила (received) 27.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Самопоширюваний високотемпературний синтез металовуглецевих наноматеріалів / Н. І. Кускова, Д. І. Челпанов, Г. М. Корзинова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 50-55. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез металлоуглеродных наноматериалов / Н. И. Кускова, Д. И. Челпанов, А. Н. Корзинова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 50-55. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Self-propagating high-temperature synthesis of metal-carbon nanomaterials / N.I. Kuskova, D. I. Chelpanov, A.N. Korziнова // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 50-55. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кускова Наталя Іванівна – доктор технічних наук, професор, зав. відділу електрофізичних досліджень, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Кускова Наталья Ивановна – доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Kuskova Natalya Ivanovna – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electrophysical Researches, Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Челпанов Дмитро Ілліч – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Челпанов Дмитрий Ильич – аспирант; Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Chelpanov Dmitry Illych – Postgraduate Student; Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, tel.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Корзинова Ганна Миколаївна – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (093) 227-17-93; email: maluchek@i.ua.

Корзинова Анна Николаевна – аспирант; Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, тел.: (093) 227-17-93; email: maluchek@i.ua.

Korziнова Anna Nikolaevna – Postgraduate Student; Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, tel.: (093) 227-17-93; email: maluchek@i.ua.

УДК 621.317.3

Ю. С. НЕМЧЕНКО

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ В НИПКИ «МОЛНИЯ» ИСПЫТАНИЙ НА МОЛНИЕСТОЙКОСТЬ ПО СТАНДАРТУ MIL-STD-461G

Детально розглянуто структуру розділу CS117 (блискавкостійкість) стандарту США на ЕМС військової техніки MIL-STD-461G. Складено детальні таблиці поширення норм випробувань на різні види джгутів і окремих провідників для літаків різної конструкції методом «кабельної інжекції» двома циклограммами випробувальних впливів: «багаторазові удари» і «багаторазові спалахи». Докладно розглянуті можливості застосування існуючих в НДПКІ «Молнія» генераторів на блискавкостійкість типу ИГЛА, а також методику їх доопрацювання під норми стандарту MIL-STD-461G.

Ключові слова: випробування, блискавкостійкість, бортове авіаційне обладнання, багаторазові удари, багаторазові спалахи, норми випробувань.

Подробно рассмотрена структура раздела CS117 (молниестойкость) стандарта США на ЭМС военной техники MIL-STD-461G. Составлены подробные таблицы распространения норм испытаний на различные виды жгутов и отдельных проводников для самолетов различной конструкции методом «кабельной инъекции» двумя циклограммами испытательных воздействий: «многократные удары» и «многократные вспышки». Подробно рассмотрены возможности применения существующих в НИПКИ «Молния» генераторов на молниестойкость типа ИГЛА, а также методику их доработки под нормы стандарта MIL-STD-461G.

Ключевые слова: испытания, молниестойкость, бортовое авиационное оборудование, многократные удары, многократная вспышка, нормы испытаний.

assembly SHS approach to form silicon carbide nanofibers. Journal of Physics: Condensed Matter. 2007, Vol. 19. P. 395022.

16. Nazhipkyzy M, Mansurov Z. A., Puri I. K., Shabanova T. A., Cyganova I. A. Poluchenie supergidrofobnoj

uglerodnoj poverhnosti pri gorenii propane [Preparation of superhydrophobic carbon surface during propane combustion]. Neft' i gaz. 2010. No. 5(59). P. 27-33.

Поступила (received) 27.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Самопоширюваний високотемпературний синтез металовуглецевих наноматеріалів / Н. І. Кускова, Д. І. Челпанов, Г. М. Корзинова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 50-55. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез металлоуглеродных наноматериалов / Н. И. Кускова, Д. И. Челпанов, А. Н. Корзинова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 50-55. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Self-propagating high-temperature synthesis of metal-carbon nanomaterials / N.I. Kuskova, D. I. Chelpanov, A.N. Korzinoва // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 50-55. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кускова Наталя Іванівна – доктор технічних наук, професор, зав. відділу електрофізичних досліджень, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Кускова Наталья Ивановна – доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Kuskova Natalya Ivanovna – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electrophysical Researches, Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Челпанов Дмитро Ілліч – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Челпанов Дмитрий Ильич – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Chelpanov Dmitry Illych – Postgraduate Student; Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, tel.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Корзинова Ганна Миколаївна – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (093) 227-17-93; email: maluchek@i.ua.

Корзинова Анна Николаевна – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (093) 227-17-93; email: maluchek@i.ua.

Korzinova Anna Nikolaevna – Postgraduate Student; Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, tel.: (093) 227-17-93; email: maluchek@i.ua.

УДК 621.317.3

Ю. С. НЕМЧЕНКО

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ В НИПКИ «МОЛНИЯ» ИСПЫТАНИЙ НА МОЛНИЕСТОЙКОСТЬ ПО СТАНДАРТУ MIL-STD-461G

Детально розглянуто структуру розділу CS117 (блискавкостійкість) стандарту США на ЕМС військової техніки MIL-STD-461G. Складено детальні таблиці поширення норм випробувань на різні види джгутів і окремих провідників для літаків різної конструкції методом «кабельної інжекції» двома циклограммами випробувальних впливів: «багаторазові удари» і «багаторазові спалахи». Докладно розглянуті можливості застосування існуючих в НДПКІ «Молнія» генераторів на блискавкостійкість типу ИГЛА, а також методику їх доопрацювання під норми стандарту MIL-STD-461G.

Ключові слова: випробування, блискавкостійкість, бортове авіаційне обладнання, багаторазові удари, багаторазові спалахи, норми випробувань.

Подробно рассмотрена структура раздела CS117 (молниестойкость) стандарта США на ЭМС военной техники MIL-STD-461G. Составлены подробные таблицы распространения норм испытаний на различные виды жгутов и отдельных проводников для самолетов различной конструкции методом «кабельной инъекции» двумя циклограммами испытательных воздействий: «многократные удары» и «многократные вспышки». Подробно рассмотрены возможности применения существующих в НИПКИ «Молния» генераторов на молниестойкость типа ИГЛА, а также методику их доработки под нормы стандарта MIL-STD-461G.

Ключевые слова: испытания, молниестойкость, бортовое авиационное оборудование, многократные удары, многократная вспышка, нормы испытаний.

Structure of the section CS117 (lightning immunity) of USA standard for EMC of military equipment MIL-STD-461G is considered in detail. Detailed tables of the test specifications on various kinds of bundled cables and separate conductors for airplanes of various designs by the method of «cable injection» with two cyclograms of test actions: «multiple strokes» and «multiple flashes» are worked out. Possibilities to use the generators of IGLA type for lightning immunity existing in RDI «Molniya», and also method of their modification according to the specifications of the standard MIL-STD-461G are considered in detail.

Key words: tests, lightning immunity, airborne equipment, multiple strokes, multiple flash, test specifications.

Введение. До недавнего времени в НИПКИ «Молния» проводились испытания бортового авиационного оборудования (БАО) для военных самолетов (в частности, для самолета АН-70) на электромагнитную совместимость (ЭМС) по советским военным стандартам. Для этих испытаний у нас имеется все необходимое испытательное и измерительное оборудование. Однако, с 2016 года испытания по этим стандартам не проводились по ряду объективных причин. Взамен же начали проводиться испытания на ЭМС аппаратуры украинской разработки для Заказчиков в странах Азии и Ближнего Востока, но уже по стандартам США серий от MIL-STD-461C до MIL-STD-461F. Эти стандарты содержали только два испытательных пакета: на измерение эмиссии радиопомех и на устойчивость к внешним электромагнитным помехам. Однако, последняя версия этих стандартов MIL-STD-461G [1] от декабря 2015 г. содержит еще два испытательных пакета: на испытания на молниестойкость (CS117) и на испытания на электростатический разряд (CS118), и если испытания по виду CS118 практически не отличаются от испытаний по стандарту IEC 61000-4-2, для которого у нас есть все необходимое оборудование, то испытания по виду CS117 требуют не только доработки существующего испытательного оборудования, но и создания нового.

Испытания на молниестойкость в НИПКИ «Молния» проводились по двум стандартам:

– по стандарту ОСТ1 01160-88 (СССР) [2] тремя формами единичных ударов (короткая «КВ», длинная «ДВ» и звенящая «ЗВ» волны) по 5 испытательным уровням методами «кабельной инъекции» волнами КВ и ЗВ и методом ввода в заземление волной ДВ. Для реализации этих испытаний у нас есть испытательный генератор ИГЛА;

– по стандарту RTCA/DO-160D (США) [3] для БАО гражданской авиации испытания проводятся пятью формами (формы 1, 2, 3, 4 и 5А) единичных и многократных ударов (МКУ), а также многократных вспышек (МКВ) формы 3 методами «контактного ввода» форм 3, 4, 5А, «кабельной инъекции» форм 1, 2, 3 и «вводом в заземление» формами 4 и 5А по 5 испытательным уровням. Для проведения этих испытаний у нас имеется практически все испытательное оборудование типов ИГЛА-КВ, ИГЛА-КИ, ИГЛА-ЗВ, ИГЛА-МКУ и ИГЛА-МВ (всего 10 единиц).

В отличие от испытания на молниестойкость по вышеперечисленным стандартам испытания по стандарту MIL-STD-461G проводятся только воздействиями видов МКУ и МКВ методом «кабельной инъекции» испытательными пакетами $I_T(\phi.1) / V_L(\phi.2)$, $V_T(\phi.3) / I_L(\phi.3)$ частотами 1 МГц и 10 МГц, $I_T(\phi.5A) / V_L(\phi.4)$, $I_T(\phi.6) / V_L(\phi.6)$, где I_T и V_T – соответственно испытательный ток и испытательное напряжение, а I_L и V_L – соответственно предельный ток

и предельное напряжение.

Для того чтобы в НИПКИ «Молния» проводить испытания на молниестойкость по стандарту MIL-STD-461G, необходимо пройти 3 этапа:

– этап 1 – сравнение выходных параметров существующих испытательных генераторов видов ИГЛА-МКУ и ИГЛА-МВ с нормами по стандарту MIL-STD-461G;

– этап 2 – доработка генераторов видов ИГЛА-МКУ и ИГЛА-МВ до этих норм;

– этап 3 – создание новых генераторов.

1 Работы по этапу 1

1.1 Формы испытательных воздействий

Для полного представления о временных параметрах испытательных воздействий ниже приведены формы единичных испытательных импульсов (рис. 1–6), а также циклограммы испытательных воздействий видов МКУ и МКВ (рис. 7–8).

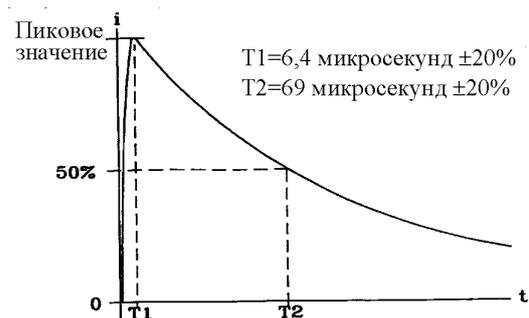


Рисунок 1 – Испытательный ток формы 1



Рисунок 2 – Предельное напряжение формы 2

МКУ – это серия из 14 последовательных импульсов одинаковой формы за время не более 1,5 с, причем 1 удар имеет амплитуду в несколько раз выше, чем последующие удары.

МКВ – это серия из импульсов одинаковой формы и одинаковой амплитуды по рис. 8.

Временные параметры циклограммы:

– интервал между испытательными импульсами в пачке T_{III} – от 50 мкс до 1000 мкс;

– количество испытательных импульсов в пачке

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

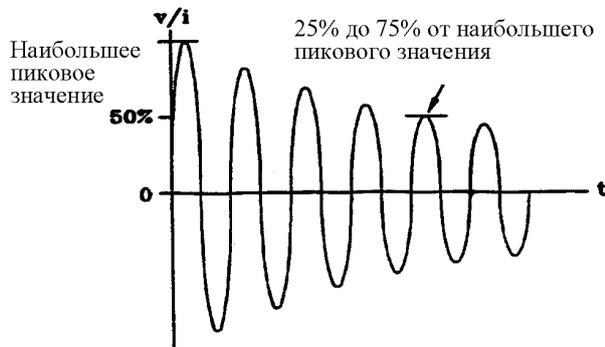


Рисунок 3 – Испытательное напряжение / предельный ток формы 3

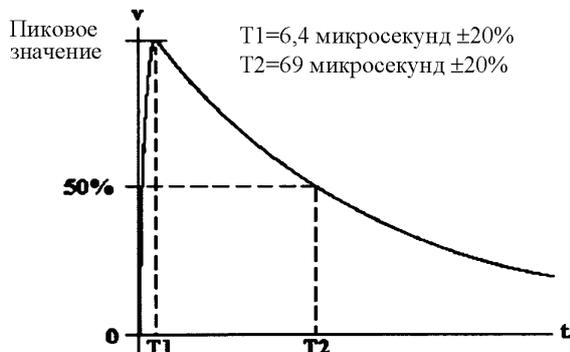


Рисунок 4 – Предельное напряжение формы 4

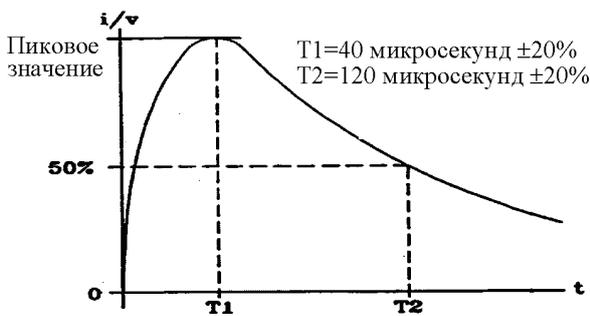


Рисунок 5 – Испытательный ток формы 5А

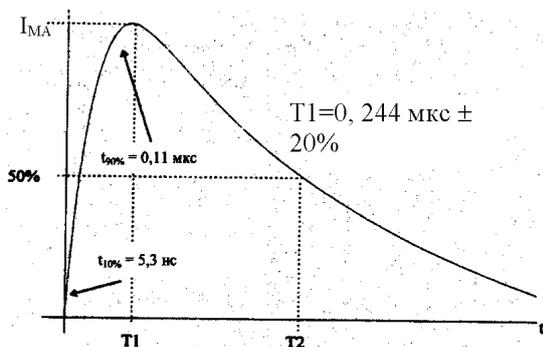


Рисунок 6 – Испытательный ток и предельное напряжение формы 6

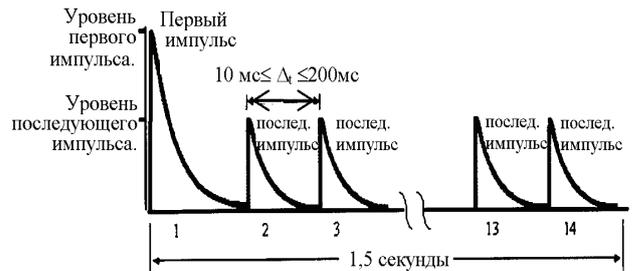


Рисунок 7 – Циклограмма испытательного воздействия вида «многократные удары»

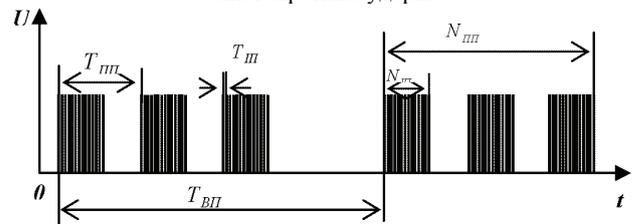


Рисунок 8 – Циклограмма испытательного воздействия вида «многократные всплески»

1.2 Сравнительные таблицы выходных параметров генераторов ИГЛА-МКУ и норм по стандарту MIL-STD-461G

Нормы на МКУ по MIL-STD-461G приведены в таблице VII этого стандарта.

Все нормы зависят от БАО, которые могут быть расположены или в ближней зоне (БЗ) растекания токов молнии (РТМ) в летательных аппаратах (ЛА) различных видов, или в дальней зоне (ДЗ) РТМ.

Нагружаемые жгуты могут быть или многопроволочные (МЖ), или однопроволочные (малопроволочные) (ОП).

Таблица 1 – Сравнение норм на испытания БАО в ближней зоне РТМ всех видов ЛА комплектом $I_T(\phi.1)/V_L(\phi.2)$ МКУ с выходными параметрами генератора ИГЛА-МКУ-1

Параметр	МЖ		ОП	
	MIL-STD-461G	ИГЛА-МКУ-1 (5 исп. ур.)	MIL-STD-461G	ИГЛА-МКУ-1 (2 исп. ур.)
1 удар	1500 А/750 В	1600 А/1600 В	150 А/750 В	125 А/125 В
2-14 удары	375 А/375 В	800 А/800 В	75 А/375 В	62,5 А/62,5 В
I_T^1 / I_T^{2-14}	1/0,25	1/0,5	1/0,5	1/0,5

Таблица 2 – Сравнение норм на испытания БАО в дальней зоне РТМ всех видов ЛА комплектом $I_T(\phi.1)/V_L(\phi.2)$ МКУ с выходными параметрами генератора ИГЛА-МКУ-1

Параметр	МЖ		ОП	
	MIL-STD-461G	ИГЛА-МКУ-1 (4 исп. ур.)	MIL-STD-461G	ИГЛА-МКУ-1 (1 исп. ур.)
1 удар	600 А/300 В	750 А/750 В	60 А/300 В	50 А/50 В
2-14 удары	150 А/150 В	375 А/375 В	30 А/150 В	25 А/25 В
I_T^1 / I_T^{2-14}	1/0,25	1/0,5	1/0,5	1/0,5

Таблица 3 – Сравнение норм на испытания БАО в ближней зоне РТМ всех видов ЛА комплектом $V_T(\phi.3)/I_L(\phi.3)$ частотами 1 МГц и 10 МГц МКУ с выходными параметрами генератора ИГЛА-МКУ-3

Параметр	МЖ		ОП	
	MIL-STD-461G	ИГЛА-МКУ-3 (4 исп. ур.)	MIL-STD-461G	ИГЛА-МКУ-3 (4 исп. ур.)
1 удар	1500 В/300 А	1500 В/300 А	1500 В/60 А	1500 В/300 А
2-14 удары	750 В/150 А	750 В/150 А	750 В/30 А	750 В/150 А
I_T^1 / I_T^{2-14}	1/0,5	1/0,5	1/0,5	1/0,5

ЛА делятся на ЛА со сплошным алюминиевым корпусом, или на ЛА с композитными фрагментами.

Таблица 4 – Сравнение норм на испытания БАО в дальней зоне РТМ всех видов ЛА комплектом $V_T(\phi.3)/I_L(\phi.3)$ частотами 1 МГц и 10 МГц МКУ с выходными параметрами генератора ИГЛА-МКУ-3

Параметр	МЖ		ОП	
	MIL-STD-461G	ИГЛА-МКУ-3 (3 исп. ур.)	MIL-STD-461G	ИГЛА-МКУ-3 (3 исп. ур.)
1 удар	600 В/120 А	600 В/120 А	600 В/24 А	600 В/120 А
2-14 удары	300 В/60 А	300 В/60 А	300 В/12 А	300 В/60 А
V_T^1 / V_T^{2-14}	1/0,5	1/0,5	1/0,5	1/0,5

Таблица 5 – Сравнение норм на испытания БАО в ближней зоне РТМ ЛА с композитными фрагментами комплектом $I_T(\phi.5A)/V_L(\phi.4)$ МКУ с выходными параметрами генератора ИГЛА-МКУ-5А

Параметр	МЖ		ОП	
	MIL-STD-461G	ИГЛА-МКУ-5А (5 исп. ур.)	MIL-STD-461G	ИГЛА-МКУ-5А (4 исп. ур.)
1 удар	2000 А/750 В	2000 А/640 В	750 А/750 В	800 А/300 В
2-14 удары	400 А/187,5 В	1000 А/320 В	375 А/187,5 В	400 А/150 В
I_T^1 / I_T^{2-14}	1/0,2	1/0,5	1/0,5	1/0,5

Таблица 6 – Сравнение норм на испытания БАО в дальней зоне РТМ ЛА с композитными фрагментами комплектом $I_T(\phi.5A)/V_L(\phi.4)$ МКУ с выходными параметрами генератора ИГЛА-МКУ-5А

Параметр	МЖ		ОП	
	MIL-STD-461G	ИГЛА-МКУ-5А (4 исп. ур.)	MIL-STD-461G	ИГЛА-МКУ-5А (3 исп. ур.)
1 удар	1000 А/300 В	800 А/300 В	300 А/300 В	400 А/120 В
2-14 удары	200 А/75 В	400 А/150 В	150 А/75 В	200 А/60 В
I_T^1 / I_T^{2-14}	1/0,2	1/0,5	1/0,5	1/0,5

Таблица 7 – Сравнение норм на испытания БАО всех видов ЛА комплектом $V_T(\phi.3)/I_L(\phi.3)$ частотами 1 МГц и 10 МГц МКВ с выходными параметрами генератора ИГЛА-МВ

Параметр	ближняя зона		дальняя зона	
	MIL-STD-461G	ИГЛА-МВ (4 исп. ур.)	MIL-STD-461G	ИГЛА-МВ (3 исп. ур.)
Амплитуда	900 В/15 А	900 В/15 А	360 В/6 А	360 В/6 А

Таблица 8 – Нормы на испытания БАО всех видов ЛА с короткими, низкоомными кабельными жгутами комплектом $I_T(\phi.6) / V_L(\phi.6)$ МКВ

Параметр	ближняя зона		дальняя зона	
	MIL-STD-461G	–	MIL-STD-461G	–
Амплитуда	75 А/ 1500 В	–	30 А/600 В	–

2 Работы по этапу 2

2.1 Методические особенности испытаний МЖ и ОП по п. 5.15.3.4 MIL-STD-461G

При испытаниях МЖ или ОП помещаются в инжектор, устанавливается оборудование для измерения токов и напряжений по рисунку CS117-10 – CS117-12, после чего начинается постепенное повышение испытательного параметра до достижения им нормы. Если же раньше будет достигнут предельный параметр, то испытательный комплект изменяется с I_T/V_L на V_T/I_L .

При испытаниях различного вида МЖ и ОП могут возникать несколько вариантов:

1. МЖ экранирован и экран заземлен в начале и в конце. В этом случае инжектор переходит в режим к.з., при котором легко достигим I_T , а $V \ll V_L$.

2. МЖ не экранирован, но в его составе есть ОП с низкоомной нагрузкой. Этот режим испытаний близок к предыдущему, потому что достигается I_T , а $V < V_L$.

3. МЖ содержит ОП только с высокоомной нагрузкой. В этом случае инжектор переходит в режим хх и сначала достигается V_L , а I_T не достигается, и тогда надо изменить испытательный комплект на противоположный.

4. МЖ содержит ОП с различной нагрузкой. В этом случае надо повышая I_T или V_T внимательно следить за тем, что будет достигнуто раньше I_T или V_L , или V_T или I_L , и только после этого в соответствии с предыдущим пунктом принять решение – какой тип генератора применять для испытаний.

2.2 Таблицы несоответствий выходных параметров генераторов ИГЛА с нормами

Анализ табл. 1-6 показывает, что основные выходные параметры генераторов ИГЛА совпадают с нормами, а именно:

- совпадают формы МКУ всех видов;
- совпадают формы единичных импульсов всех видов в циклограмме МКУ.

Выходные параметры генератора ИГЛА-МВ-3 [5] полностью совпадают с нормами.

Генератор ИГЛА-МВ-6 отсутствует.

Таблица 9 – Несоответствие отдельных параметров в табл. 1 и 2

Амплитуда первого удара и соотношение I_T^1 / I_T^{2-14}		MIL-STD-461G	ИГЛА
МЖ БЗ	I_T	1500 А	1600 А
	V_L	750 В	1600 В
	I_T^1 / I_T^{2-14}	1/0,25	1/0,5
МЖ ДЗ	I_T	600 А	750 А
	V_L	300 В	750 В
	I_T^1 / I_T^{2-14}	1/0,25	1/0,5
ОП БЗ	I_T	150 А	125 А
	V_L	750 В	125 В
	I_T^1 / I_T^{2-14}	1/0,5	1/0,5
ОП ДЗ	I_T	60 А	50 А
	V_L	300 В	50 В
	I_T^1 / I_T^{2-14}	1/0,5	1/0,5

Таблица 10 – Несоответствие отдельных параметров в табл. 3 и 4. Для МЖ БЗ и МЖ ДЗ выходные параметры ИГЛА-МКУ-3 [4] полностью совпадают с нормами

Амплитуда первого удара и соотношение V_T^1 / V_T^{2-14}		MIL-STD-461G	ИГЛА
ОП БЗ	V_T	1500В	1500В
	I_L	60 А	300А
	V_T^1 / V_T^{2-14}	1/0,5	1/0,5
ОП ДЗ	V_T	600 В	600 В
	I_L	24 А	120 А
	V_T^1 / V_T^{2-14}	1/0,5	1/0,5

Таблица 11 – Несоответствие отдельных параметров в табл. 5 и 6

Амплитуда первого удара и соотношение I_T^1 / I_T^{2-14}		MIL-STD-461G	ИГЛА
МЖ БЗ	I_T	2000А	2000 А
	V_L	750 В	640 В
	I_T^1 / I_T^{2-14}	1/0,2	1/0,5
МЖ ДЗ	I_T	1000 А	800 А
	V_L	300 В	300 В
	I_T^1 / I_T^{2-14}	1/0,2	1/0,5
ОП БЗ	I_T	750 А	800 А
	V_L	750 В	300 В
	I_T^1 / I_T^{2-14}	1/0,5	1/0,5
ОП ДЗ	I_T	300 А	400 А
	V_L	300 В	120 В
	I_T^1 / I_T^{2-14}	1/0,5	1/0,5

2.3 Методика доработки генераторов ИГЛА-МКУ

2.3.1 Методика доработки генераторов ИГЛА-МКУ-1 и ИГЛА-МКУ-2

Доработка генератора ИГЛА-МКУ-1[6] заключается в возможности изменении амплитуды испытательного тока и соотношения I_T^1 / I_T^{2-14} .

Для изменения амплитуды испытательного тока в генераторе ИГЛА-МКУ-1 необходимо:

- отсоединить от внутреннего источника высокого напряжения емкостной накопитель генератора;
- установить новый переключатель ЗАРЯД на два положения ВНЕШНИЙ – ВНУТРЕННИЙ;
- к клеммам положения ВНЕШНИЙ подключить

разъем ЗАРЯД;

– к разъему ЗАРЯД при испытаниях подключать внешний источник высокого напряжения величиной не менее 3 кВ с плавной регулировкой.

Для изменения величины соотношения I_T^1 / I_T^{2-14} в генераторе ИГЛА-МКУ-1 необходимо:

– установить новый переключатель СООТНОШЕНИЕ на два положения DO-160D – MIL-STD-461G;

– к емкостному накопителю генератора подключить зарядный резистор с величиной сопротивления вдвое больше, чем предыдущий (тем самым мы увеличим вдвое постоянную времени заряда емкостного накопителя и следовательно уменьшим вдвое амплитуду последующих ударов);

– первоначальный зарядный резистор подключить к клемме DO-160D, а новый зарядный резистор к клемме MIL-STD-461G;

– если необходимо изменять величину испытательного напряжения (по п. 3 раздела 2.1), то аналогичные операции необходимо проделать с генератором ИГЛА-МКУ-2; [7];

– для проведения испытаний по п. 4 раздела 2.1 необходимо, чтобы оба генератора были соответственно модернизированы.

2.3.2 Методика доработки генераторов ИГЛА-МКУ-4 и ИГЛА-МКУ-5А

Доработка генератора ИГЛА-МКУ-5А [8] заключается в возможности изменения амплитуды испытательного тока и соотношения I_T^1 / I_T^{2-14} и подключения к ним инжектора ИТ-1,2.

Для подключения инжектора к генераторам необходимо создать узел подключения инжектора.

Для изменения амплитуды испытательного тока в генераторе ИГЛА-МКУ-5А необходимо:

- отсоединить от внутреннего источника высокого напряжения емкостной накопитель генератора;
- установить новый переключатель ЗАРЯД на два положения ВНЕШНИЙ – ВНУТРЕННИЙ;
- к клеммам положения ВНЕШНИЙ подключить разъем ЗАРЯД;

– к разъему ЗАРЯД при испытаниях подключать внешний источник высокого напряжения величиной не менее 5 кВ с плавной регулировкой.

Для изменения величины соотношения I_T^1 / I_T^{2-14} в генераторе ИГЛА-МКУ-5А необходимо:

– установить переключатель СООТНОШЕНИЕ на два положения DO-160D – MIL-STD-461G;

– к емкостному накопителю генератора подключить зарядный резистор с величиной сопротивления вдвое больше, чем существующий (тем самым мы увеличим вдвое постоянную времени заряда емкостного накопителя и следовательно уменьшим вдвое амплитуду последующих ударов);

– первоначальный зарядный резистор подключить к клемме DO-160D, а новый зарядный резистор к клемме MIL-STD-461G;

– если необходимо изменять величину испытательного напряжения (по п. 3 раздела 2.1), то анало-

гичные операции необходимо проделать с генератором ИГЛА-МКУ-4; [9]

– для проведения испытаний по п. 4 раздела 2.1 необходимо, чтобы оба генератора были соответственно модернизированы.

Выводы

Для выполнения испытаний по табл. 8 необходимо создать новый генератор ИГЛА-МКВ-6. Для этого нужно использовать опыт и конструктивные элементы генератора ИГЛА-МКВ-3 и, в частности, довольно сложную, но подходящую нам, систему создания циклограммы МКВ по рис. 8, а в качестве инжектора применить инжектор ИТ-1,2.

Список литературы:

1. MIL-STD-461G Department of defense interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.
2. ОСТ 1 01160-88 Оборудование бортового самолетов и вертолетов. Методы испытаний на молниестойкость.
3. RTCA/DO-160D, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, prepared by RTCA.
4. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («многократные удары») формы 3 ИГЛА-МКУ-3. Руководство по эксплуатации ИГЛА-МКУ-3.000.000.000 РЭ.
5. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («многократные вспышки», форма 3, частота 10 МГц) ИГЛА-МВ-3-10 МГц. Руководство по эксплуатации ИГЛА-МВ-3-10 МГц.000.000.000 РЭ.
6. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («многократные удары») формы 1 ИГЛА-МКУ-1. Руководство по эксплуатации ИГЛА-МКУ-1.000.000.000 РЭ.
7. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («многократные удары») формы 2 ИГЛА-МКУ-2. Руководство по эксплуатации ИГЛА-МКУ-2.000.000.000 РЭ.
8. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («многократные уда-

ры») формы 5А ИГЛА-МКУ-5А. Руководство по эксплуатации ИГЛА-МКУ-5.000.000.000 РЭ.

9. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («многократные удары») формы 4 ИГЛА-МКУ-4. Руководство по эксплуатации ИГЛА-МКУ-4.000.000.000 РЭ.

Bibliography (transliterated):

1. MIL-STD-461G Department of defense interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.
2. OST 1 01160-88 Oborudovanie bortovoe samoletov i vertoletov. Metody ispytaniy na molniestojkost'
3. RTCA/DO-160D, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, prepared by RTCA.
4. Generator dlja provedenija ispytaniy bortovogo avia-cionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («mnogokratnye udary») formy 3 IGLA-MKU-3. Rukovodstvo po jekspluatácii IGLA-MKU-3.000.000.000 RJe.
5. Generator dlja provedenija ispytaniy bortovogo avia-cionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («mnogokratnye vspyshki», forma 3, chastota 10 MGc) IGLA-MV-3-10 MGc. Rukovodstvo po jekspluatácii IGLA-MV-3-10 MGc.000.000.000 RJe.
6. Generator dlja provedenija ispytaniy bortovogo avia-cionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («mnogokratnye udary») formy 1 IGLA-MKU-1. Rukovodstvo po jekspluatácii IGLA-MKU-1.000.000.000 RJe.
7. Generator dlja provedenija ispytaniy bortovogo avia-cionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («mnogokratnye udary») formy 2 IGLA-MKU-2. Rukovodstvo po jekspluatácii IGLA-MKU-2.000.000.000 RJe.
8. Generator dlja provedenija ispytaniy bortovogo avia-cionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («mnogokratnye udary») formy 5A IGLA-MKU-5A. Rukovodstvo po jekspluatácii IGLA-MKU-5.000.000.000 RJe.
9. Generator dlja provedenija ispytaniy bortovogo avia-cionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («mnogokratnye udary») formy 4 IGLA-MKU-4. Rukovodstvo po jekspluatácii IGLA-MKU-4.000.000.000 RJe.

Поступила (received) 20.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Можливість проведення в НДПКІ «Молнія» випробувань на блискавкостійкість за стандартом MIL-STD-461G / Ю.С. Немченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 55-60. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Возможность проведения в НИПКИ «Молния» испытаний на молниестойкость по стандарту MIL-STD-461G / Ю.С. Немченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 55-60. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Possibility to carry out tests for lightning immunity according to standard MIL-STD-461G in RDI «Molniya» / Yu.S.Nemchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 55-60. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Немченко Юрій Семенович – головний метролог, НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-68-68.

Немченко Юрий Семенович – главный метролог, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-68-68.

Nemchenko Jurij Semenovich – Main metrologist, NDPKI "Molniya" NTU "KhPI", tel.: (057) 707-68-68.

УДК 537.528 : 577.23

С. В. ПЕТРИЧЕНКО, П. Л. ЦОЛІН, А. В. СІНЧУК**ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОЇ ОБРОБКИ БІОСИРОВИНИ НА ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ МЕТАНОГЕНЕЗУ**

Показано, що динаміка метаногенезу суттєво змінюється після попередньої електророзрядної обробки біосировини, в залежності від набору характеристик, що притаманні тому чи іншому режиму імпульсного коронного розряду в біосировині. Обґрунтовано варіанти досягнення позитивного по результатам газоутворення балансу між негативним ефектом від пригнічення мікрофлори і позитивним ефектом від збільшення біодоступності поживних речовин., зокрема в системах з повним або частковим спустошенням ферментаторів та в системах з послідовною подачею субстратів.

Ключові слова: електророзрядна обробка; імпульсний коронний розряд; метаногенез; біогаз.

Показано, что динамика метаногенеза существенно меняется после предварительной электроразрядной обработки биосырья, в зависимости от набора характеристик, присущих тому или иному режиму импульсного коронного разряда в биосырье. Обоснованно варианты достижения положительного по результатам газообразования баланса между негативным эффектом от угнетения микрофлоры и положительным эффектом от увеличения биодоступности питательных веществ, в частности в системах с полным, или частичным опустошением ферментаторов в системах с последовательной подачей субстратов.

Ключевые слова: электроразрядная обработка; импульсный коронный разряд; метаногенез; биогаз.

It is shown that the dynamic of methanogenesis significantly changes after preliminary electric discharge treatment of biomass depending on the set of characteristics inherent to either pulse corona discharge mode in the biomaterial. It is shown that the change in the total energy during treatment of the biomass does not entail a unidirectional effect (an increase or decrease in gas formation). The options for the achievement of balance between the negative effect of the inhibition of microflora and the positive effect of increase in bioavailability of nutrients, in particular in systems with complete or partial depletion of fermentors and in systems with successive supply of substrates, are justified.

Keywords: electric discharge treatment; pulse corona discharge; methanogenesis; biogas.

Вступ. Поширення біогазових технологій потребує збільшення степеня розкладання органіки в реакторах біогазових установок понад 40-60 % та/або скорочення циклу повного розкладання біомаси, а також підвищення частки метану в біогазі до рівня вмісту в природному газі.

Для «мокрого методу» [1] синтезу біогазу означених ефектів досягають шляхом попередньої обробки біосировини (БС) з метою її подрібнення і гомогенізації, вилучення поживних речовин і стимуляції мікроорганізмів. Це можливо реалізувати за рахунок значної гідродинамічної дії та струмів розтікання, які охоплюють певний об'єм БС і створюють в ній помірний розподілений градієнт електромагнітного поля [2-11].

Відомо, що такий комплекс властивостей проявляється під час високовольтного імпульсного коронного розряду (ІКР), який можна реалізувати у широкому діапазоні електропровідності гетерогенного біологічного середовища з високим вмістом твердофазних дисперсних включень у рідині, тобто ІКР є цілком прийнятним для обробки біомаси в промислових масштабах з метою її підготовки до метаногенезу.

Раніше техніко-економічними розрахунками було підтверджено доцільність застосування високовольтної електророзрядної обробки біомаси, а саме визначено, що прибуток від приросту утвореного біогазу може значно перевищувати витрати на обробку біомаси. Показано, що в підготовленій відповідно до умов виробництва біогазу біомасі можуть бути реалізовані стабільні режими ІКР з відносним енерговиділенням впродовж тривалості півперіоду даного короткозамкнутого контуру (τ^*), що сягає значень $\eta = 0,2 \pm 0,95$ від

запасеної у конденсаторній батареї енергії і, разом з іншими показниками ІКР визначає інтенсивність гідродинамічної дії на середовище. Запропоновано розглядати електророзрядну інтенсифікацію бродіння і як наслідок електрокінетичних процесів в біомасі та стохастичного резонансу – збігу власних частот імпульсів біологічного об'єкта з діапазоном частот імпульсів, індукованих від зовнішнього джерела. Тоді показник η , інтеграл дії електричного струму одиничного розряду (I_d), енергія в імпульсі і максимальна електрична потужність розряду можуть бути ключовими з точки зору ефективного впливу на біомасу, а експериментальні дослідження їх впливу на вихід біогазу, кислотно-лужний баланс біомаси і вміст метану в біогазі впродовж циклу мезофільного бродіння – актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого є метою даної роботи.

Експериментальні методики і обладнання

Наразі, для досягнення мети, потрібно вирішити такі підготовчі задачі: обґрунтувати вибір біосировини, розробити методику її підготовки до анаеробного бродіння, створити лабораторний біореактор, що найбільш повно відтворює умови в промислових біогазових установках, забезпечити відповідні можливості щодо періодичного відбору проб біогазу і БС, технічні і методичні засоби їх аналізу.

Вибір і підготовка біосировини. Вочевидь, актуальною в умовах сьогодення для України є переробка власних відходів фермерських господарств (за виключенням муніципального господарства де наразі більш актуальним є капітальний ремонт існуючих мереж). В

цьому сегменті за даними Біоенергетичної асоціації України (2012 рік) економічно обґрунтований потенціал складають:

– відходи тваринництва – від 0,29 до 0,60 млрд. м³ СН₄ на рік (пропозиція щодо сировини: 7,4 млн. голів свиней; 4,4 млн. голів крупної рогатої худоби; 200 млн. голів птиць);

– силос кукурудзи – 0,90 млрд. м³ СН₄ на рік (пропозиції щодо сировини – 0,84 млн. га, 15 т/га).

Однак, за даними тієї ж асоціації для існуючих масштабних біогазових установок (всі на основі мезофільного процесу) співвідношення таких, що працюють на відходах тваринництва і рослинній сировині становить 56/1, причому всі відходи тваринництва – свинячий гній і гній крупної рогатої худоби.

Тому оптимальним базовим компонентом вихідної сировини для експерименту є гній, а в разі локалізації біогазових технологій на малі і середні фермерські господарства – саме свинячий гній.

Багаторічний досвід впровадження біогазових установок у Німеччині дозволив достатньо повно розробити методики розрахунку компонентного складу субстратів з різних видів доступної сировини в різні сезонні періоди тощо, та систематизувати інформацію у [1]. На підставі цих даних нами проведено необхідні розрахунки для конкретно обраної сировини – свинячого гною.

Загальновідомо, що для «мокрого методу» вміст органічної сухої речовини (ОСР) у Завантаженні (робочій об'єм ферментатора) δ_{C3} повинен знаходитись в діапазоні від 5 до 15 масових процентів (поза діапазоном – неефективне використання об'ємів і площ, або ж перекормлювання і труднощі перемішування). Інший вміст – вода і неорганічні речовини у вихідній сировині (гної).

Щоб забезпечити відповідну пропорцію вагових показників ОСР/вода при визначеному робочому об'ємі ферментатора V_3 можна скористатися системою рівнянь

$$\begin{cases} \frac{m_{\Gamma} \cdot \delta_{CP} + m_{\Gamma} \cdot (1 - \delta_{CP})}{\rho_{\Gamma}} + \frac{m_B}{\rho_B} = V_3; \\ \frac{m_{\Gamma} \cdot \delta_{CP} \cdot \delta_{OCP}}{m_B} = \delta_{C3}, \end{cases} \quad (1)$$

де m_{Γ} , ρ_{Γ} – вага і щільність гною, відповідно, кг і кг/м³; m_B , ρ_B – вага і щільність води, відповідно, кг і кг/м³; δ_{CP} – вміст сухої речовини у гної, мас. %; δ_{OCP} – вміст органічної сухої речовини у сухій речовині, мас. %.

Тоді необхідну вагу води і гною можна визначити на підставі виразу (2) з урахуванням даних табл. 1

$$\begin{cases} m_B = V_3 \left/ \left(\frac{\delta_{C3} / \delta_{OCP} + \left(\frac{\delta_{C3}}{\delta_{CP}} \cdot \delta_{OCP} \right) \cdot (1 - \delta_{CP})}{\rho_{\Gamma}} + \frac{1}{\rho_B} \right) \right.; \\ m_{\Gamma} = \frac{\delta_{C3} \cdot m_B}{\delta_{CP} \cdot \delta_{OCP}}. \end{cases} \quad (2)$$

де, як і в (1), підстановка δ_{CP} , δ_{OCP} і δ_{C3} здійснюється у масових відносних одиницях, наприклад δ_{CP} [мас. в.о.] = δ_{CP} [мас. %]/100.

Таблиця 1 – Коливання у складі свинячого гною і виході біогазу за умов мезофільного процесу бродіння протягом 30 днів [1]

δ_{CP} , мас. %	2,5 – 13
δ_{OCP} , мас. %	52 – 84
ОСР / одну свиню/ одну добу, кг	2,5 – 4,0
Рівень рН	6,5 – 7,6
Сирі волокна, мас.% від сухої речовини (СР) без врахування підстилки	17
Сирий жир, мас.% від СР	9
Сирий протеїн, мас.% від СР	24
Екстракти, що не містять азоту (вуглеводні), мас.% від СР	32
Загальний вміст азоту, г/л	3,9 – 8,0
Питомий вихід газу з ОСР, л/кг	220 – 637
Газопродуктивність, м ³ / одну свиню/ одну добу	0,60 – 1,25

Більш точні дані щодо вмісту сухої речовини у гної можуть бути отримані і експериментальним шляхом. Для цього потрібно зважити певну кількість гною (близько 50 г), помістити в контейнер, витримати контейнер з гном протягом 24 год при температурі від 105 до 110 °С і зважити повторно. Відношення результатів повторного зважування до початкової ваги гною (x100, якщо у відсотках) становитиме величину δ_{CP} для даної сировини.

За результатами наших експериментів щодо визначення δ_{CP} для різного гною (з кишково-шлункового тракту і підстилки), відібраного на фермерському господарстві, ця величина знаходилась в діапазоні від 10 до 13 %. Перед початком кожної серії експериментів величину δ_{CP} визначали окремо експериментальним шляхом для даної партії гною, разом з δ_{CP} визначали і щільність гною ρ_{Γ} та на підставі (2) розраховували його необхідну вагу для додавання у воду так, щоб об'єм Завантаження становив 1,5 дм³. Після цього Завантаження ретельно розмішували з однаковою інтенсивністю і кількістю оборотів для кожного ферментатора.

Лабораторний біореактор. У промислових біогазових установках частіше використовують мезофільний режим анаеробного бродіння, середній цикл якого складає від 10 до 20 діб. Тому потрібно розробити компактну модель біогазової установки із замкнутим циклом, таким чином, щоб можна було виготовити декілька однакових лабораторних біореакторів для їх паралельного (у часі) запуску після електророзрядної обробки в однакових температурних умовах. Однакові температурні умови було реалізовано шляхом встановлення лабораторних біореакторів (рис. 1) в термошафу, оснащену трубчастим електронагрівачем (ТЕН), та термостатом для стабілізації температури на рівні 35±1 °С (рис. 2, а), що відповідає мезофільному режиму метаногенезу.

До базового складу біогазових установок (разом с системою стабілізації температури) входять ферментатор, мішалка і газонакопичувач, а також відповідні трубопроводи (баластові ємності і інша периферія не розглядалися).

За будовою ферментатори поділяють на такі, що мають горизонтальну, або вертикальну конструкцію.

Обидва типи можуть бути наземного, або підземного розташування і мають свої переваги і недоліки. Більш вигідне співвідношення площі поверхні до об'єму завантаженої БС, менші теплові втрати і обмеженість щодо об'єму завантаження (до 6000 м³) властиві вертикальному типу, який і було обрано за базовий для моделі ферментатора біореактора (рис. 1, а).

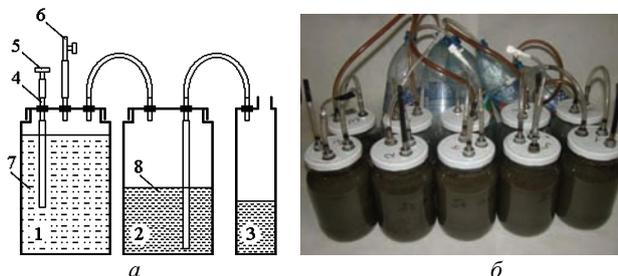


Рисунок 1 – Модель біогазової установки (а) і зовнішній вигляд (б) лабораторних біореакторів:

1 – ферментатор; 2 – газонакопичувач; 3 – ємність для вимірювання об'єму води; 4 – штуцери; 5 – трубка з пробкою для відбору проб Завантаження; 6 – запірний вентиль для відбору проб біогазу; 7 – Завантаження; 8 – вода

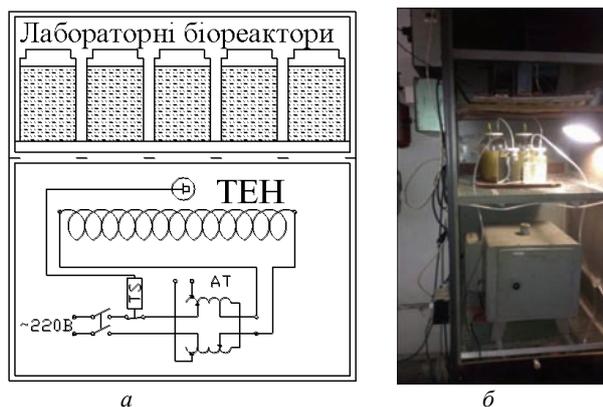


Рисунок 2 – Принципова схема (а) і зовнішній вигляд (б) термошафи з лабораторними біореакторами

Відомо, що за умови виробітку тепла з біогазу об'єм накопичувача біогазу повинен вміщувати всю кількість газу, вироблену за добу, при виробництві електроенергії – від 20 до 50 % відсотків цього показника [1]. Виходячи з цих умов та оціночного добового газоутворення (табл. 1) вирішено вибрати однакові об'єми лабораторного газонакопичувача і ферментатора, а саме об'єми резервуарів – 1,7 дм³, при цьому об'єм Завантаження повинен становити 1,5 дм³. В якості ферментатора і газонакопичувача застосувати скляні банки з герметичними металевими кришками багатозастосування (рис. 1, а). Для відведення газу кришку ферментатора було оснащено штуцерним комплектом. Ще два аналогічних комплекти було встановлено в кришці ферментатора для відбору проб біогазу і Завантаження. Штуцер для відбору проб Завантаження з внутрішньої сторони кришки з'єднано з трубою, яка доходить до середини по висоті банки, з зовнішньої сторони – з трубою, оснащеною на вільному кінці резиновою пробкою. Штуцер для відбору проб біогазу з'єднано ззовні кришки з трубою, осна-

щеною на кінці запірним вентилем.

Газонакопичувачі (або газгольдери) розрізняють за будовою, розміром і робочим тиском. Для вирішення експериментальних задач роботи доцільним є застосування газонакопичувача низького тиску (до 50 мбар, або до 500 мм водяного стовпа), який відображає принцип дії газгольдера з резервуарами, що занурюються (мокрый газгольдер). Останнім часом, внаслідок високої вартості, такі газгольдери застосовують в біогазових установках не часто, але накопичення газу в умовах відносно однакового тиску є необхідною вимогою експерименту, а можливість замерзання і теплових втрат виключено шляхом проведення ферментації і газонакопичення в шафі-термостаті з контрольованою температурою атмосфери.

Для лабораторних умов більш зручним і простим є відображення описаного принципу дії, схематично представлено на рис. 1, а, яке полягає у наступному. Біогаз з ферментатора через трубку надходить до герметичного резервуару, заповненого водою, і витісняє воду через іншу трубку вертикально занурену у воду до певної відстані від днища резервуара газонакопичувача. Далі, витіснена вода поступає в ємність для вимірювання її об'єму. На практиці для реалізації схеми застосовують таку ж банку як для ферментатора з двома штуцерами у кришці, причому один з них ззовні кришки з'єднано трубою з штуцером для відведення біогазу з ферментатора. Інший штуцер з внутрішньої сторони кришки з'єднано з вертикально зануреною трубою, ззовні з – трубою для відведення води у міру (наприклад) ємність (негерметичну).

Процедура застосування лабораторного біореактора після електророзрядної обробки Завантаження у ферментаторі (позиції відповідно до рис. 1, а). Резервуар газонакопичувача (банку) заповнюють водою таким чином, щоб її верхній рівень не доходив до вільного кінця штуцера через який надходить біогаз при закрученій кришці. Закручують кришку газонакопичувача і продувають систему на предмет контролю герметичності. Закручують кришку ферментатора, перекривають запірний вентиль 6 і встановлюють пробку 5, продувають систему на предмет герметичності. З'єднують відповідні штуцери ферментатора і газонакопичувача трубою (всі інші елементи вже змонтовано заздалегідь). Встановлюють комплект разом з іншими в термошафу. Один раз на добу в той же самий час вимірюють об'єм води, що відповідає об'єму біогазу в ємності 3 і опорожняють цю ємність. Двічі на добу без розгерметизації лабораторного біореактора здійснюють перемішування Завантаження. Після перемішування виймають пробку 5, відбирають пробу біосировини (Завантаження). По мірі заповнення газонакопичувача біогазом здійснюють його перезарядку з одночасним відбором біогазу для аналізу.

Кислотно-лужний баланс визначали шляхом потенціометричного вимірювання активності іонів водню (рН) за допомогою іонометра лабораторного И-160М (діапазон рН від -20,000 до 20,000 з основною похибкою $\pm 0,020$ для одновалентних іонів) та із застосуванням індикаторного паперу. Для визначення відсоткового вмісту метану в біогазі застосовувався тер-

мокондуктометричний датчик ТП-2,0

Після проведення попередньої обробки БС ІКР за режимами, основні характеристики яких наведено в табл. 2, одночасно для всіх зразків реєстрували вихід біогазу, вміст в ньому метану та зміни кислотно-лужного балансу біосировини.

Таблиця 2 – Початкові умови реалізації і основні характеристики ІКР в БС

	№ режиму (зразка)				
	0	1	2	3	4
U_0 , кВ	15	15	11	20	
C , мкФ	1	0,25	1	0,1	
W_0 , Дж	112,5	28,13	60,5	20,0	
n , імпл.	11	44	20	62	
$n \cdot W_0$, кДж	1,238	1,238	1,210	1,240	
τ_p , мкс	35	15	35	10	
$\eta(W_{\tau_p}/W_0)$	0,33	0,72	0,19	0,81	
W_{τ_p}/W_0	0,70	0,99	0,43	0,81	
W_{τ_p} , Дж	78,75	27,85	26,02	16,20	
$n \cdot W_{\tau_p}$, кДж	0,866	1,225	0,520	1,004	
I_d , А ² ·с	3,946	1,295	1,240	1,958	
N_{\max} , МВ·А	13,9	21,1	8,9	25,9	

де U_0 , C – зарядна напруга і ємність конденсаторного накопичувача енергії; W_0 – запасена енергія одного імпульсу; n – число імпульсів попередньої обробки БС; τ_p – тривалість активної фази розряду (до моменту часу, коли розрядний струм не перевищує 5 % від амплітудного значення); W_{τ_p} – енергія, що виділилася в розрядному проміжку впродовж τ_p ; N_{\max} – максимальне значення миттєвої потужності електричного розряду; I_d – інтеграл дії електричного струму.

Слід зауважити, що обробку за кожним режимом (кожного зразка) проводили з майже однаковою сумарною запасеною енергією обробки ($n \cdot W_0$).

Нормування об'єму біогазу, що утворився впродовж певного часу (впродовж доби, або накопичувана сума від першої до поточної доби), здійснювали до середнього за цикл бродіння (20 діб) добового значення об'єму газоутворення з контрольного зразка Завантаження (без попередньої обробки) для даного виду сировини. Так, нормоване добове газоутворення визначалося величиною

$$\Delta_i^r = \frac{\Delta V_i}{\sum_{n=1}^Z \Delta V_n / Z}, \quad (3)$$

де i – номер доби; r – номер режиму обробки відповідно до табл. 2; Z – загальна кількість діб циклу бродіння; ΔV_i , ΔV_n – об'єм газу, що утворився впродовж i -тої або n -ї доби відповідно, а нормована накопичувана сума газоутворення від першої до поточної доби визначалася величиною

$$\Sigma \Delta_i = \frac{\sum_{n=1}^i \Delta V_n}{\sum_{n=1}^Z \Delta V_n / Z}. \quad (4)$$

Результати експерименту і їх обговорення

Для ясності викладення подальшого матеріалу, номер зразка відповідатиме номеру режиму обробки, відповідно до табл. 2.

Набір експериментальних результатів розглядався окремо для кожного зразка. В останню, 20-ту добу бродіння, для контролю життєздатності мікрофлори, температуру підвищували до умов термофільного режиму бродіння.

Показано, що досягнення максимуму добового газоутворення для зразків 1 і 2 (12-13 доба), супроводжується стрибкоподібним підвищенням кислотності біомаси. Вочевидь, збільшення ступеня біодоступності органічної поживної речовини, призводить до змінення балансу C:N біомаси в бік зменшення величини цього співвідношення нижче значення 10, а при C:N<8, як це відомо, спостерігається сповільнення розвитку бактерій і зменшення виходу біогазу, що можна прослідкувати на відповідних залежностях Δ_i^r (рис. 3, 4). Пояснити це можна тим, що близько 50-60 % від загальної кількості вмісту азоту в зброджуваному субстраті зберігається у вигляді амонію, і, зростання рН, що наближається до показника 8,5 призводить до активізації амонієвого буферного ефекту за схемою: $NH_3 + H^+ \leftrightarrow NH_4^+$.

Так, відомо, що при рН=7,0, співвідношення амоній:аміак дорівнює 99:1, а вже при рН = 9,0 воно становить 70:30. За принципом від'ємного зворотного зв'язку це призводить до підвищення кислотності, а також до інтоксикації мікрофлори, що й підтверджується різким падінням добового виходу біогазу для зразків 1 і 2, де рівень ступінчастого збільшення рН максимальний (в межах максимуму залежностей Δ_i^1 і Δ_i^2).

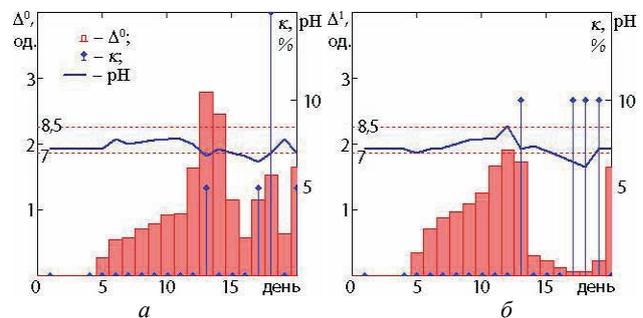


Рисунок 3 – Типові залежності нормованого добового виходу біогазу, рівня рН біомаси і відсоткового змінення вмісту метану в складі біогазу (k) для контрольного зразка 0 (а) і обробленого 1 (б)

Інша ситуація спостерігається для контрольного зразка, де максимум Δ_0 більший приблизно на 50 % і супроводжується зменшенням рівня рН біомаси. Однак, цього зменшення недостатньо для активізації карбонатного буферного ефекту за схемою: $HCO_3^+ + H^+ \leftrightarrow H_2CO_3$, оскільки рівень рН досягає близьких до оптимального значень для комплексу процесів метаногенезу. Зменшення рівня рН біомаси можна пояснити порушенням оптимального співвідношення між кількістю оцтової і пропіонової (пропанової) кислоти – 3:1 в бік зниження внаслідок інтенсивного розщеплення оцтової кислоти, що зазвичай призводить до підвищення кислотного еквіваленту [1], або ж дефіцитом азоту внаслідок високої швидкості його споживання метаногенними бактеріями, що також

призводить до лімітації процесу газоутворення.

Для зразків 3 і 4 також, як і для зразка 1, спостерігається різке підвищення рівня рН під час максимального добового газоутворення, але до менших значень і, вочевидь, амонієвий буферний ефект виражений слабкіше та не призводить до критичної інтоксикації мікрофлори. Наслідком є відсутність майже повного припинення газоутворення, як це має місце для зразків 1 і 2.

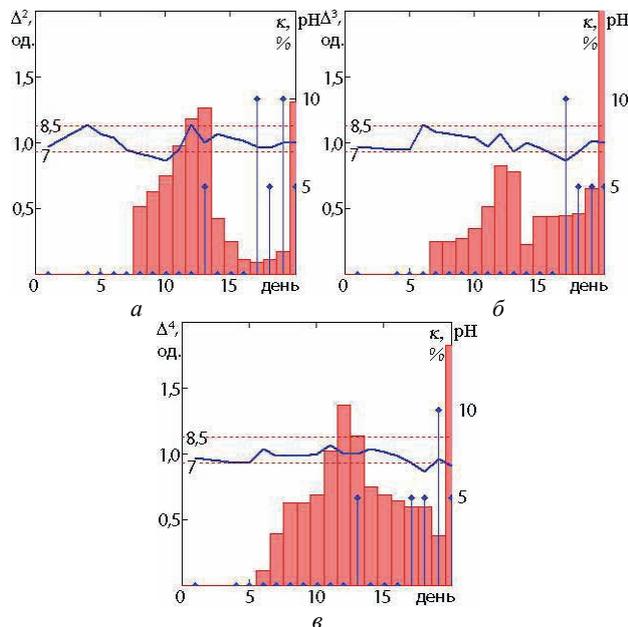


Рисунок 4 – Типові залежності нормованого добового виходу біогазу, рівня рН біомаси і відсоткового збільшення вмісту метану в складі біогазу для зразків 2 (а), 3 (б), 4 (в)

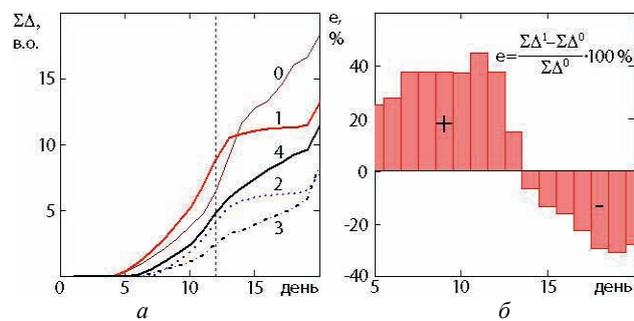


Рисунок 5 – Нормована накопичувана сума газоутворення (а) і відносний до контрольного приріст нормованої накопичуваної суми газоутворення (е) з біомаси зразка 1 (б)

Надалі, починаючи з 14-15 доби для всіх зразків активізується фаза ацетогенезу, що супроводжується помірним (впродовж 4-5 діб) зниженням рівня рН до значень 6,2-7,0. Оскільки фаза ацидогенезу (окислення) продовжується з більш стійкими поживними компонентами біомаси, сумарний кислотний еквівалент збільшується, але повільніше ніж за умов активізації буферних ефектів. Протягом цього періоду збільшується кількість поживних речовин для метаногенних бактерій після чого відбувається певне підвищення добового газоутворення більш суттєве для зразків, де до початку підвищення меншою була нормована накопичувана сума газоутворення (рис. 5). При цьому

для зразків 1-4 росте і стабілізується на близькому до оптимального значенні рівень рН, а для контрольного зразка, ймовірно, спостерігається ситуація, аналогічна описаній вище щодо зменшення співвідношення C:N нижче критичного рівня (~8).

Відомо [2], що такі фактори дії імпульсного коронного розряду на мікрофлору як ультрафіолетове випромінювання, продукти термолізу і електролізу, ударно-хвильові і кавітаційні процеси в середовищі, високі температури в природних зонах за певних умов призводять до пригнічення та знищення бактерій. Так, для імпульсної корони з суцільним плазмовим утворенням, за близьких до використаних в цій роботі параметрів розрядного контуру, бактерицидну дію для питомих енерговитрат $4,8 \text{ кДж/дм}^3$ можна охарактеризувати відношенням E-coli індексу зразка після електророзрядної обробки до E-coli індексу контрольного зразка ($2 \cdot 10^8$), яке становить близько 0,1%. В [2] для такого майже повного знищення мікрофлори були створені спеціальні умови, а для питомих енерговитрат в 16 і 32 кДж/дм^3 це відношення вже становило $4,5 \cdot 10^{-4}$ і $4,5 \cdot 10^{-5}$ %, відповідно (суттєво нелінійна залежність). Провести обґрунтовану оцінку щодо бактерицидної дії імпульсної корони із питомими сумарними енерговитратами в діапазонах і на культури, що розглядалися в даній роботі, на підставі наведених даних неможливо. Однак можливо припустити знищення значної частини популяції перших поколінь корисних бактерій. Такий висновок в цілому підтверджується аналізом часових залежностей нормованих накопичуваних сум газовиділення (рис. 5). Для більшої частини зразків (2, 3 і 4) спостерігається запізнення початку фази метаногенезу, менші значення добового газоутворення, а також накопичуваної суми газоутворення і загального виходу біогазу протягом періоду обороту реактора. Проте, вірогідно, існують режими імпульсного коронного розряду (і відповідні умови їх реалізації) і синтезу біогазу за порційним методом, що дозволяють досягти ситуації, коли збільшення біодоступності субстратів перевищує за результатом газоутворення шкоду від пригнічення і знищення певної частини мікрофлори. Таке припущення підтверджується результатами щодо виходу і складу біогазу з біомаси зразка 1, де впродовж визначеного періоду (до 13 діб від початку зброджування) спостерігається приріст накопичуваної суми газоутворення по відношенню до контрольного зразка до 40% (рис. 5, б). з одночасним підвищенням вмісту метану, який стабілізується на рівні 10%.

Імпульсний коронний розряд для зразка 1 характеризується максимальними, серед реалізованих, значеннями інтеграла дії електричного струму (табл. 2), та фактичної енергії, що виділилася в розрядному проміжку протягом активної фази розряду і протягом часу τ^* . Проте, максимальна потужність розряду має помірні значення, а сумарне фактичне енерговиділення впродовж всієї обробки зразка 1, обчислене на підставі виразу $n \cdot W_{\text{сп}} / W_0$ не є найбільшим для реалізованих режимів розряду.

Майже вдвічі більшою від значення режиму для зразка 1 є максимальна електрична потужність розряду

ду для зразка 4, а інтеграл дії електричного струму для цього режиму (4) є другим за величиною серед досліджуваних. Накопичувана сума газовиділення для біомаси, попередньо обробленого зразка 4 є більшою після зразка 1 серед оброблених зразків протягом всього часу ферментації, а нормоване добове газовиділення одразу після моменту часу, що відповідає його екстремуму, є взагалі максимальним. Однак результат щодо сумарного газовиділення є нижчим від контрольного зразка.

Зразок 2 характеризується меншим від значення зразка 4 максимумом електричної потужності розряду, але другим за величиною серед досліджуваних зразків. За комплексною оцінкою дози енергії, що виділилася впродовж активної фази розряду і інтеграла дії електричного струму, режим обробки 2-го зразка є найбільш близьким до 3 зразка і обидва ці режими попередньої обробки біомаси є гіршими щодо накопичуваної суми газовиділення протягом всього періоду ферментації, хоча зразок 3 показує певний приріст нормованого добового газовиділення наприкінці процесу.

Характер часових залежностей накопичуваних сум газовиділення є близьким попарно, для зразків № 1 і № 2 (з однаковою зарядною напругою але різними ємностями накопичувача) та зразків № 3 і № 4 (найбільша ємність і найменше зарядна напруга накопичувача, та найменша ємність і найбільша зарядна напруга накопичувача, відповідно). Перша пара режимів попередньої обробки призводить до різкого зменшення добового газовиділення після досягнення його максимуму і відповідного насичення на кривих накопичуваних сум газовиділення, друга – характеризується більшим добовим газовиділенням впродовж періоду, що настає після його максимуму.

Таким чином, вірогідно, попередня електророзрядна обробка зразків 1, 2 і 4 призводить до збільшення біодоступності сировини насамперед по мірі збільшення значення інтеграла дії електричного струму. Фронти часових залежностей накопичуваних сум газоутворення для зразків 2 і 4 до моменту максимального добового газоутворення майже співпадають (рис. 5). Після цього моменту для зразка 4, що характеризується попередньою обробкою з найбільшою максимальною потужністю розряду, накопичування газу продовжується майже лінійно, а для зразків 1 і 2 спостерігається насичення кривих нормованих накопичуваних сум газоутворення, що вірогідно пов'язано з інтоксикацією мікрофлори, причини якої були означені вище. Лінійне продовження газонакопичення для зразка 4 може бути пов'язане з частковим руйнуванням структури лігноцелюлози, оскільки цей режим характеризується найбільшою електричною потужністю ІКР і значенням η .

Таким чином, незалежно від фактичної сумарної енергії обробки ($n \cdot W_{\text{тр}}$) кращий результат з загального газовиділення за весь цикл метаногенезу мають зразки 1 і 4, при цьому режим обробки для зразка 1 характеризується найбільшою фактичною енергією одиничного розряду ($W_{\text{тр}}$), а режим 4 найменшою серед досліджуваних. Однак обидва режими виділяються се-

ред інших найбільшими значеннями інтегралу дії електричного струму.

Для режимів 2 і 4 фронти часових залежностей накопичуваних сум газовиділення майже співпадають, при цьому обидва режими характеризуються найбільш близькими значеннями η і N_{max} , що є більшими за аналогічними показниками для інших режимів.

Характер часових залежностей накопичуваних сум, попарно, для зразків 1 і 2 та 3 і 4 є близьким (рис. 5, а). Режимми 1 і 2 характеризуються насиченням відповідних кривих залежностей, що має місце в момент часу після досягнення максимуму добового газоутворення (рис. 3, б і 4, а). Для режимів 3 і 4 не спостерігається різкий спад добового газоутворення (рис. 4, б, в).

Впродовж майже всього циклу бродіння найменші значення накопичуваної суми газоутворення мав зразок 3, режим ІКР, що його застосовували при попередній обробці даної БС характеризувався найнижчими серед всіх інших значеннями η , N_{max} і I_d .

Отже, якщо застосовують повне спустошення ферментатора і період обороту біореактора не перевищує 12-13 діб, попередня електророзрядна обробка біомаси ІКР за режимом 1 з питомими енерговитратами до 900 МДж/м³ може дозволити на 40 % збільшити вихід біогазу і, відповідно до молярних об'ємів складових біогазу, ступінь розкладання біосировини. В абсолютних одиницях, на 1 м³ робочого об'єму ферментатора, такий приріст виходу за припущення, що біосировина розкладеться на 30-40 % становитиме приблизно 4 м³ при умові, що для підготовки до бродіння вибрано $\delta_{\text{сз}} \approx 5$ %. Тривалість такої попередньої обробки 1 м³ не перевищуватиме за нашими оцінками, 10 хвилин, що, вочевидь, не призведе до суттєвих експлуатаційних витрат.

Якщо застосовують часткове випорожнення ферментатора з максимальним періодом обороту ферментатора (навіть 25 діб), то як правило, кожні півперіоду половина його об'єму випорожнюється і додається така ж кількість незброженої БС. В такому разі також є перспектива застосування попередньої електророзрядної обробки БС за режимами 1, 2 і 4 після запуску біореактора на сировині, що не піддавалася дії ІКР. В такому разі ефект пригнічення або знищення мікрофлори внаслідок дії електричного розряду може бути компенсовано розвинутою популяцією мікроорганізмів, що вже присутні у ферментаторі, а інтоксикація аміаком від надмірного «лужного» збродження (ацетогенезу) може бути усунена додаванням більш кислого середовища, яким є нова порція завантаження.

При послідовній подачі БС можна припустити, що додавання вихідної сировини у кількості еквівалентній 4 % («підкормка») [1] від вмісту ОСР біореактора, навіть при знищенні в ній значної частки популяції бактерій, слабо вплине на загальну популяцію мікроорганізмів у ферментаторі, також нівелюється можливе порушення в ній балансу поживних речовин С:N. Тому застосування попередньої ІКР "підкормки" за режимами 1, 2 і 4 має перспективи щодо збільшення продуктивності в біогазових установках з послідов-

ною подачею сировини. Однак в даному разі, також як і для порційної подачі сировини з частковим випорожненням ферментатора, враховуючи безперервність процесу ферментації потрібно провести додаткові дослідження з ін'єкціями у контрольний ферментатор відповідних доз обробленої електричним розрядом біомаси.

Щодо ступеня руйнування структури лігноцелюлози внаслідок механічної дії ІКР результати роботи не дозволяють сформулювати достатньо обґрунтованих висновків насамперед тому, що імпульсний тиск є одним з основних факторів знищення мікрофлори у біомасі. З високою вірогідністю можна припустити, що для руйнування структури рослинних волокон у «необмеженому» об'ємі, яким по відношенню до електричного розряду є промисловий ферментатор, пріоритетною умовою буде забезпечення максимальної амплітуди хвилі тиску, а величина імпульсу тиску (Па·с) відійде на другий план. Враховуючи велику кількість біологічних факторів, що впливають на процеси метаногенезу, надати оцінку руйнування структури лігноцелюлози, опосередковано, на підставі змінення інтенсивності газоутворення і розкладання біомаси наразі неможливо.

Висновки. На підставі аналізу динаміки виходу біогазу, схем газонакопичення, методів ферментації і принципів роботи промислових біогазових установок розроблено і реалізовано конструкцію лабораторного біореактора, що відображає умови синтезу біогазу за «мокрим методом» та газонакопичення низького тиску у газгольдері з резервуарами, що занурюються. Визначено процедуру сумісного застосування комплексу лабораторних біореакторів з різними режимами обробки зразків БС в однакових умовах з контрольованою температурою і тиском, яка дозволяє моделювати технологічний процес ферментації. Вибрано оптимальний вид сировини і розроблено методику розрахунку і підготовки БС до процесу бродіння.

Показано що динаміка метаногенезу суттєво змінюється після попередньої електророзрядної обробки біосировини, залежності від набору характеристик, що притаманні тому чи іншому режиму ІКР в БС. Насамперед, цими характеристиками є інтеграл дії електричного струму, відносно енерговиділення впродовж тривалості півперіоду даного короткозамкнутого контуру, амплітуда електричної потужності розряду, фактична енергія, що виділилася в БС впродовж активної стадії одиничного розряду. Змінення сумарної фактичної енергії обробки БС не призводить до односпрямованого ефекту, щодо збільшення, або зменшення газоутворення, як в динаміці так і в обсязі накопичуваних сум.

Визначено режим попередньої електророзрядної обробки біомаси, що дозволяє для біоустановок з періодом обороту біореактора до двох тижнів збільшити (до 40 %) вихід біогазу з незмінною щодо контрольної якістю біогазу по вмісту метану.

Запропоновано декілька гіпотез щодо причин пригнічення або знищення певної частини популяції мікрофлори, або збільшення біодоступності поживних

речовин субстратів, що можуть бути прямими або побіжними наслідками попередньої обробки.

Обґрунтовано варіанти досягнення позитивного за результатами газоутворення балансу між негативним ефектом від пригнічення мікрофлори і позитивним ефектом від збільшення біодоступності поживних речовин, зокрема в системах з повним або частковим випорожненням ферментаторів та в системах з послідовною подачею субстратів.

Список літератури:

1. Биогазовые установки / Ред. И. А. Реддих. – ZorgBiogas, 2011. Режим доступа: http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas_plants_Practics.pdf/.
2. Богуславский Л. З. Плазменные фильтры для обеззараживания сточных вод / Л. З. Богуславский, Е. В. Кривицкий, В. Н. Петриченко // Электронная обработка материалов. – 1995. – № 2. – С. 22-26.
3. McCabe A. Increased efficiency of substrate utilization by exposure of the thermotolerant yeast strain, *Kluyveromyces marxianus* IMB3 to electric-field stimulation / A. McCabe, N. Barron, L. McHale, A. P. McHale // Biotechnology Techniques. – 1995. – Vol. 9, iss. 2. – P. 133-136.
4. Salerno M. B. Using a pulsed electric field as a pretreatment for improved biosolids digestion and methanogenesis / M. B. Salerno, H. S. Lee, P. Parameswaran, B. E. Rittmann // Water Environment Research. – 2009. – Vol. 81(8). – P. 831-839.
5. The Biogas Handbook: Science, Production and Applications / Edited by A. Wellinger, J. Murphy and D. Baxter. – Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2013. – 463 p.
6. Lehner A. Optimierung der Verfahrenstechnik landwirtschaftlicher Biogasanlagen – Abschlussbericht (end-of-project report) / A. Lehner, M. Effenberger, A. Gronauer. – 2009. URL <http://www.lfl.bayern.de/ilt/umwelttechnik/13727/>.
7. Chen Y. Biostimulation by direct voltage to enhance anaerobic digestion of waste activated sludge / Y. Chen, B. Yu, C. Yin, C. Zhang, X. Dai, H. Yuan and N. Zhu // RSC Advances. – 2016. – Iss. 6. – P.1581-1588.
8. Kim Dong-Hyun Influence of Applied Voltage for Bioelectrochemical Anaerobic Digestion of Sewage Sludge / Dong-Hyun Kim, Young-Chae Song, Feng Qing // Journal of Korean Society of Environmental Engineers. – 2015. – Vol. 37, iss. 9. – P. 542-549.
9. Zhao Zhiqiang Potential for direct interspecies electron transfer in an electric-anaerobic system to increase methane production from sludge digestion/ Zhiqiang Zhao, Yaobin Zhang, Liying Wang and Xie Quan // Scientific Reports. – 2015. – Vol. 5. – Article number: 11094; doi:10.1038/srep11094.
10. Hunt Ryan W. Electromagnetic Biostimulation of Living Cultures for Biotechnology, Biofuel and Bioenergy Applications / Ryan W. Hunt, A. Zavalin, A. Bhatnagar, S. Chinnasamy and K. C. Das. // International Journal of Molecular Sciences. – 2009. – Vol. 10(10). – P. 4515-4558.
11. Наумова О. В. Совершенствование электроимпульсной технологии при получении биогаза из органических отходов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве» / О. В. Наумова. – Саратов, 2005. – 28 с.

References (transliterated):

1. Reddih I. A., ed. Biogas plants. ZorgBiogas, 2011. (Rus. ed.: Reddih I. A., ed. Biogazovye ustanovki. ZorgBiogas, 2011.). Available at: http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas_plants_Practics.pdf/ (accessed 12.05.2016).

2. Boguslavskij L. Z., Krivickij E. V., Petrichenko V. N. Plazmennye fil'try dlja obezzarazhivaniya stochnyh vod [Plasma filters for disinfection of waste water]. *Jelektronnaja obrabotka materialov*. 1995, no. 2, pp. 22-26.
3. McCabe A., Barron N., McHale L., McHale A. P. Increased efficiency of substrate utilization by exposure of the thermotolerant yeast strain, *Kluyveromyces marxianus* IMB3 to electric-field stimulation. *Biotechnology Techniques*. 1995, vol. 9, iss. 2, pp. 133-136.
4. Salerno M. B., Lee H. S., Parameswaran P., Rittmann B. E. Using a pulsed electric field as a pretreatment for improved biosolids digestion and methanogenesis. *Water Environment Research*. 2009, vol. 81(8), pp. 831-839.
5. Wellinger A., Murphy J., Baxter D. *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications* Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi: Woodhead Publishing Limited. 2013, 463 p.
6. Lehner A., Effenberger M., Gronauer A., Optimierung der Verfahrenstechnik lande wirtschaftlichere Biogasanlagen - Abschlussbericht (end-of-project report), 2009. Available at: <http://www.lfl.bayern.de/ilt/umwelttechnik/13727/> (accessed 03.06.2016).
7. Chen Y., Yu B., Yin C., Zhang C., Dai X., Yuan H., Zhu N. Biostimulation by direct voltage to enhance anaerobic digestion of waste activated sludge. *RSC Advances*. 2016, iss. 6, pp. 1581-1588.
8. Kim Dong-Hyun, Song Young-Chae, Qing Feng Influence of Applied Voltage for Bioelectrochemical Anaerobic Digestion of Sewage Sludge. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 2015, vol. 37, iss. 9, pp. 542-549.
9. Zhao Zhiqiang, Zhang Yaobin, Wang Liying, Quan Xie Potential for direct interspecies electron transfer in an electric-anaerobic system to increase methane production from sludge digestion. *Scientific Reports*. 2015, vol. 5, Article number: 11094; doi:10.1038/srep11094.
10. Hunt Ryan W., Zavalin A., Bhatnagar A., Chinnasamy S., Das K. C. Electromagnetic Biostimulation of Living Cultures for Biotechnology, Biofuel and Bioenergy Applications. *International Journal of Molecular Sciences*. 2009, vol. 10(10), pp. 4515-4558.
11. Naumova O. V. Sovershenstvovanie jelektoimpul'snoj tehnologii pri poluchenii biogaza iz organicheskikh othodov avtoref. dis. na soiskanie uch. stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.20.02 "Jelektrrotehnologii i jelektrroborudovanie v sel'skom-hozjajstve" [Perfection of electropulse technology in obtaining biogas from organic waste Abstract of a thesis dr. tech. sci. diss. 05.20.20 "Electrotechnologies and electrical equipment in agriculture"]. Saratov, 2005. 28 p.

Надійшла (received) 17.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив попередньої електророзрядної обробки біосировини на основні показники метаногенезу / С. В. Петриченко, П. Л. Цолін, А. В. Синчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 61-68. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Влияние предварительной электроразрядной обработки биосырья на основные показатели метаногенеза / С. В. Петриченко, П. Л. Цолін, А. В. Синчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 61-68. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Influence of preliminary electrodischarge treatment of biomass on the main indicators of methanogenesis / S. V. Petrichenko, P. L. Tsolin, A. V. Sychuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 61-68. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Петриченко Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, (067) 887-39-30; e-mail: petrichsergey@gmail.com

Петриченко Сергей Викторович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (067) 887-39-30; e-mail: petrichsergey@gmail.com.

Petrichenko Sergey Victorovich – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine; tel.: (067) 887-39-30; e-mail: petrichsergey@gmail.com.

Цолін Павло Леонідович – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України; тел.: (093) 375-05-44; email: tsolinpasha@gmail.com.

Цолін Павел Леонидович – младший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (093) 375-05-44; email: tsolinpasha@gmail.com.

Tsolin Pavel Leonidovich – Research Assistant, Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine; tel.: (067) 514-77-78; email: tsolinpasha@gmail.com.

Синчук Алла Вадимівна – кандидат технічних наук, вчений секретар, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України; тел.: +38(0512) 58-71-40; email: ssts@iippt.com.ua.

Синчук Алла Вадимовна – кандидат технических наук, ученый секретарь, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: +38(0512) 58-71-40; email: ssts@iippt.com.ua.

Sychuk Alla Vadimovna – Candidate of Technical Sciences, scientific secretary, Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine; tel.: +38(0512) 58-71-40; email: ssts@iippt.com.ua.

УДК 537.528:577.23

С. В. ПЕТРИЧЕНКО, П. Л. ЦОЛІН, А. В. СІНЧУК

ОБЛАДНАННЯ ТА РЕЖИМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОЇ ОБРОБКИ БІОМАСИ

Обґрунтовано можливість інтенсифікації отримання біогазу шляхом обробки біомаси імпульсним коронним розрядом. Реалізовано різні види електричного розряду в модельному розчині. Розроблені і випробувані варіанти електродних систем для роботи в промислових ферментаторах. Формалізовано критерій і визначені умови здійснення різних режимів імпульсної корони в біомасі. Показано існування екстремуму залежності максимальної потужності розряду від запропонованого критерію і багаторазову відмінність значень інтеграла дії розрядного струму.

Ключові слова: електророзрядна обробка; імпульсний коронний розряд; електродна система; біомаса; біогаз.

Обоснована возможность интенсификации получения биогаза путем обработки биомассы импульсным коронным разрядом. Реализованы разные виды электрического разряда в модельном растворе. Разработаны и испытаны варианты электродных систем для работы в промышленных ферментаторах. Формализован критерий и определены условия осуществления различных режимов импульсной короны в биомассе. Показано существование экстремума зависимости максимальной мощности разряда от предложенного критерия и многократное отличие значений интеграла действия разрядного тока.

Ключевые слова: электроразрядная обработка; импульсный коронный разряд; электродная система; биомасса; биогаз.

The possibility of using a pulsed corona discharge for biomass treatment in order to intensify biogas production was justified. The criterion for differentiation of different pulse corona regimes was proposed, and the electrode system suitable for processing of industrial volumes was developed and tested on a model solution of NaCl. The combinations of initial conditions for the implementation of pulse corona in biomass which provide a wide range of values of the fraction of electric energy ($\eta = 0.2 - 0.95$) accumulated in capacitors and released during the first half-period of the current discharge for this circuit was determined. The possibility of the existence of an dependence extremum of the maximum discharge power on the criterion η was experimentally shown, with the difference between the values of the electric current integral for the tried regimes of treatment equals almost to 4 times.

Keywords: electric discharge treatment; pulse corona discharge; electrode system; biomass; biogas.

Вступ. Поряд з іншими поновлюваними джерелами енергії перспективним і економічно доцільним енергетичним рішенням для України, яка має розвинений агропромисловий комплекс, є використання процесу утилізації відходів сільського господарства і харчового виробництва на основі анаеробного бродіння. Анаеробне метанове бродіння біомаси комплексно вирішує три важливі завдання: виробництво енергоносія – біогазу, який навіть без очищення від домішок має енергоємність від 20 до 25 МДж/м³; знешкодження насіння бур'янів і, в значній мірі, ліквідація хвороботворних мікроорганізмів; утворення органічного добрива, в якому зберігаються всі основні поживні речовини і цінність якого може перевищувати цінність виробленого біогазу. Але більш широке впровадження біогазових технологій у порівнянні з традиційними джерелами енергії в контексті дилеми «ціна – якість – продуктивність» потребує вирішення двох проблем:

– підвищення частки метану в біогазі до рівня місткості природного газу;

– збільшення ступеня розкладання органіки в реакторах біогазових установок понад 40-60 % і скорочення циклу повного розкладання біомаси.

Відповідні рішення в значній мірі криються в застосуванні однорідної, штучно створеної сировини за умови її глибокої гомогенізації на рівні молекулярних зв'язків, бажано, з видаленням лігніну і руйнуванням кристалічної структури целюлози, що збільшує її біодоступність і ступінь розкладання. Публікація достатньо змістовних оглядів, які детально характеризують переваги, недоліки і області застосування таких способів попередньої обробки біомаси, як теплова, біоло-

гічна, хімічна і фізична обробка, свідчить про активний пошук в цьому напрямі [1–4].

Оскільки процес бродіння має електрохімічну природу, тобто на нього можна впливати шляхом електростимуляції, останнім часом також з'являються спроби дослідників обробляти біологічний субстрат електричним полем і електричним струмом [5–13]. Наприклад, в роботі [5] показано, що вплив електричних імпульсів напругою 0,25 кВ і тривалістю 10 мс в присутності ферменту целюлози дозволило збільшити вихід етанолу з рослинного субстрату майже на 40 % в порівнянні з контрольною партією. Автори [6] застосували імпульсне електричне поле з робочими параметрами в межах 1,1–19,8 кВт·год/м³, спостерігаючи суттєве збільшення виходу метану з гною свиней, частка якого після 30 днів зброджування досягала 100 %. В [7] згадується про використання німецькими компаніями Südchemie і Vogelsang проточного електродинамічного пристрою, до якого прикладається напруга в діапазоні від 10 до 100 кВ. З іншого боку, автори дослідження [8], показали, що обробка в проточному режимі слабо впливає на збільшення виходу біогазу, і прийшли до висновку, що електричне поле краще використовувати на стадії попередньої обробки біомаси. Результати роботи [9, 10, 11] показали, що гідроліз шлама стічних вод і процес окислення може прискорити незначна постійна напруга в 0,3–0,9 В. Огляд [12] надав широкий спектр потенційно корисних біоефектів, які відкриваються внаслідок електро- і електромагнітної стимуляції різних мікроорганізмів, бактерій, мікроводоростей, і інформації – як ці ефекти можна використовувати для вирощування, збору і пе-

реробки біомаси, для виробництва біопалива, біоенергії і біопродуктів. Автори з Росії [13], які виявили збільшення виходу біогазу від 2 до 5 разів на одиницю об'єму метантенка, а також збільшення процентного вмісту метану на 10 %, застосовували обробку біомаси імпульсами напругою 7 кВ.

Основною причиною розбіжностей в результатах зазначених досліджень, більшість яких проведена в лабораторних умовах, є відсутність чітко виявлених режимів електрообробки, ефективних щодо впливу на метаногенез та придатних з точки зору технічної реалізації для використання в промислових масштабах.

Метою цієї роботи є розробка електрообладнання та визначення енергетичних режимів його роботи, які реалізують імпульсну електророзрядну обробку біомаси з урахуванням балансу «ефективність – вартість».

Вибір режимів роботи електрообладнання

Оскільки питання полягає у визначенні точного дозування електричної енергії, необхідної для активації метаногенезу в значних об'ємах ферментатора, то застосування експозиції напруги величиною в декілька Вольт для ефективної обробки біомаси в промислових умовах є маловірогідним. Більш придатним рішенням у цьому випадку є високовольтна електророзрядна обробка, що може здійснюватись безпосередньо в метантенках. Шляхом значної концентрації електричної енергії високовольтних імпульсів можна впливати на біологічну сировину навіть на молекулярному рівні, розриваючи складні зв'язки волокон органічних речовин. В результаті цього процесу, дисперсність і однорідність біологічної маси збільшуватимуться, а головне – може прискорюватися перетравлення її стійких компонентів (лігніну). З іншого боку, щоб стимулювати життєдіяльність бактерій, потрібні помірні електроколювання.

З фізичної точки зору призначена для анаеробного бродіння біомаса є гетерогенним середовищем, яке містить воду і 10–20 % сухого органічного субстрату. Потенційно можна розглядати чотири основних види розряду в такому середовищі.

1. Лінійний високовольтний пробій міжелектродного проміжку. Його реалізація потребує низької і однорідної питомої електропровідності по всьому об'єму ферментатора, тобто гомогенного щодо агрегатного стану середовища, що не відповідає реальному стану біосировини.

2. Лінійний пробій, ініційований мікропровідником, який потребує високошвидкісної і надійної системи подачі провідника в проміжок, супроводжується насиченням біомаси дисперсною фазою металу, що також робить недоцільним застосування лінійного пробію, ініційованого мікропровідником як різновиду розряду в даній роботі.

3. Електричний вибух провідника, що також має зазначені вище недоліки.

4. Імпульсний коронний розряд, який є найбільш прийнятним для обробки біомаси. З підвищенням питомої електропровідності середовища він стабілізу-

ється, переходить у форму з суцільним плазмовим утворенням. Реалізується у широкому діапазоні електропровідності рідкого середовища σ_0 , слабо чутливий до коливань σ_0 , міжелектродної відстані, наявності твердофазних дисперсних включень у рідині. Характеризується струмами розтікання, що охоплюють значний об'єм середовища і створюють помірний розподілений градієнт електромагнітного поля, значною гідродинамічною дією, порівняною з лінійним пробієм.

Для формування імпульсного коронного розряду було розроблено високовольтну експериментальну установку, з системою реєстрації високовольтних імпульсів струму, що включає в себе осцилограф, низькоомний малоіндуктивний шунт та подільник напруги, а також дві оригінальні електродні системи (рис. 1). Електродна система «С» складалася з протиелектрода із розвиненою відкритою металевою поверхнею, виготовленого з латунного прутка, і електрода-вістря, виготовленого з високовольтного багатожилкового мідного кабелю із оголеною частиною довжиною 10 мм, скріплених між собою поліетиленовим ізолятором-кришкою. Електродна система «Г» складалася з протиелектрода із розвиненою відкритою металевою поверхнею, виготовленого з сталюого кутику, і електрода-вістря такої ж конструкції, скріплених на діелектричній арматурі. Мінімальна відстань між оголеними металевими частинами електрода-вістря і протиелектрода становила для системи «С» – близько 50 мм, а для системи «Г» – близько 20 мм. Застосування таких двох електродних систем з однаковою сумарною площею відкритої металевої поверхні і різним розподіленням поверхонь (анод-катод) зумовлене забезпеченням близьких значень струмів розтікання при відмінних рівнях гідродинамічної дії, а також оцінкою можливості формування наскрізного пробію між електродами в умовах наявності у рідині високої концентрації твердофазних провідних включень.

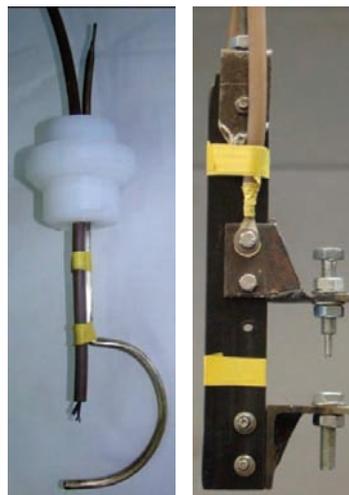


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд електродної системи «С» (а) і «Г» (б)

Застосовувана в роботі номенклатура електрообладнання дозволяла проводити експерименти з дозуванням енергії W_0 в імпульсі від одиниць Дж до одиниць кДж, в діапазоні зарядних напруг U_0 до 25 кВ.

Дозування електричної енергії в імпульсі забезпечувалося варіюванням зарядної напруги і ємності накопичувача енергії C , індуктивність розрядного контуру була помірною ($L_K = 2,5$ мкГн) і в ході проведення експериментів не варіювалася. Обмеження діапазону варіювання C і U_0 здійснювалось за наступним техніко-економічним обґрунтуванням.

Якщо очікувати 1 %-вий приріст виходу біогазу протягом обороту ферментатора, то за умови середнього вмісту сухої речовини в біомасі 10 % в абсолютних одиницях на 1 м^3 він становитиме близько $0,4 \text{ м}^3$. Враховуючи ціни на природний газ і електроенергію, а також прийнявши мінімальну концентрацію метану у біогазі на рівні 55 %, ефект такого приросту для 1 м^3 відповідатиме вартості щонайменш $0,8 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ електроенергії. Тобто, величина питомої електроенергії на електророзрядну обробку порції не повинна перевищувати $0,8 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$. Враховуючи високий рівень капітальних і експлуатаційних видатків за умови заданого гіпотетично очікуваного низького приросту, доцільно встановити максимальне значення питомої енергії обробки біомаси $W_{\Pi, \max}$ на рівні $0,25 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$, тобто 30 % від $0,8 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$.

Відомо [14], що при експлуатації біогазових установок проводять так зване «підкормлювання» бактерій сировиною в еквівалентному об'ємі до 5 % від об'єму біомаси в ферментаторі на добу. Таким чином, для ферментатора з резервуаром на 1000 м^3 щодобовий об'єм біомаси, який необхідно перед додаванням (або після додавання сировини в певну область ферментатора) обробити електричним розрядом становитиме близько 50 м^3 . За умови потужності електрообладнання P_B до 5 кВА, ККД простого зарядного пристрою $\eta_{ЗП} \approx 0,5$ і коефіцієнта включення $k_B \approx 0,5$ (для здійснення операцій по переміщенню електродної системи тощо) для означеної вище максимальної питомої енергії обробки біомаси $W_{\Pi, \max}$ продуктивність Π_{\max} , яку можна визначити на підставі виразу (1), становитиме $5 \text{ м}^3/\text{год}$, що є цілком достатнім показником для обробки 50 м^3 біомаси при роботі високовольтного обладнання протягом 10 годин на добу.

$$\Pi_{\max} = \frac{P_B \cdot \eta_{ЗП} \cdot k_B \cdot \Delta t}{W_{\Pi, \max}}, \quad (1)$$

де Δt – період визначення продуктивності (в даному випадку дорівнює 3600 с).

З іншого боку, мінімальна робоча напруга для стабільної роботи повітряного розрядника становить 10 кВ, а максимальна частота – 10 Гц, отже можна розрахувати максимальну ємність накопичувача енергії C , виходячи з міркувань забезпечення максимальної енергії в імпульсі при мінімальній зарядній напрузі і максимальній частоті слідування імпульсів (f_i).

$$P_B \cdot \eta_{ЗП} \cdot k_B > \frac{C \cdot U_0^2}{2} \cdot f_i \rightarrow C < 2 \cdot \frac{P_B \cdot \eta_{ЗП} \cdot k_B}{U_0^2 \cdot f_i}. \quad (2)$$

Результатом такого обчислення є умова $C < 2,5$ мкФ. Якщо врахувати, що час заряджання ємності має бути меншим ніж період слідування імпульсів, та доступні номінали високовольтних конденсаторів, можна встановити верхній ліміт діапазону $C = 1$ мкФ, а сам діапазон розширити від цього зна-

чення в бік менших ємностей на порядок.

З урахуванням вищевказаних міркувань, діапазон експериментальних значень C становив від 0,1 до 1 мкФ при варіюванні U_0 від 10 до 25 кВ і однакових чи близьких значеннях сумарної енергії однієї обробки W_{Σ} , що забезпечувалося цілим числом імпульсів n . Відповідні режими електророзрядної обробки зазначено в табл. 1. При цьому поняття «різні режими розряду» детермінували величиною η , яка характеризується відношенням енергії W_{τ^*} , що виділилася в міжелектродному проміжку впродовж часу, який відповідає півперіоду струму в даному короткозамкненому контурі (τ^*), до енергії, накопиченої у конденсаторі W_0 :

$$\eta = \frac{W_{\tau^*}}{W_0}; \quad (3)$$

$$W_{\tau^*} = \int_0^{\tau^*} i_P(t) \cdot u_{МЕП}(t) dt; \quad (4)$$

$$\tau^* = \pi \cdot \sqrt{L_K C}, \quad (5)$$

де i_P – розрядний струм, А; $u_{МЕП}$ – напруга на міжелектродному проміжку, В. Інтегрування виконували чисельними методами на підставі відцифрованих осцилограм електророзрядного процесу.

Таблиця 1 – Режимы обробки біомаси.

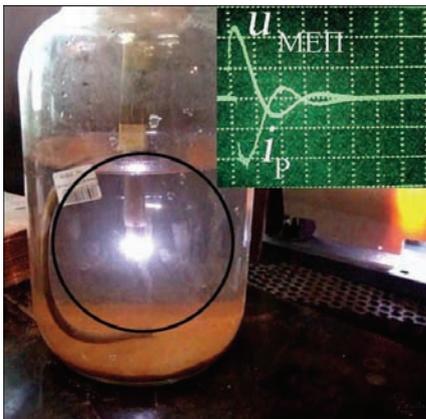
№ режиму	U_0 , кВ	C , мкФ	W_0 , Дж	n , імпульсів	W_{Σ} , кДж
0	контрольний				
1	15	1	112,50	11	1,238
2	15	0,25	28,13	44	1,238
3	15	0,1	11,25	110	1,238
4	11	1	60,5	20	1,210
5	20	0,1	20,00	62	1,240

Дослідження можливості формування імпульсного коронного розряду на обох видах електродних систем здійснено з застосуванням модельного водного розчину NaCl, що відображав питому електропровідність σ_0 біомаси в діапазоні від 0,25 до 2,5 См/м. В якості натуральної біомаси, що мала подібні значення σ_0 і піддавалась електророзрядній обробці, використовувався розчин свинячого гною з вмістом сухої речовини в діапазоні від 10 до 13 %. Обробка здійснювалась в скляній посудині із завантаженням $1,5$ та 3 дм^3 .

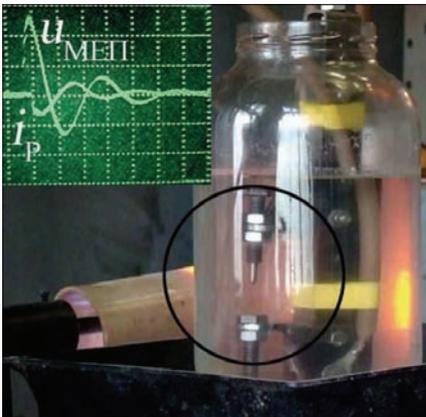
Результати тестування режимів роботи електрообладнання

Прискоренню процесів розкладання біомаси і підвищенню виходу біогазу внаслідок попередньої електророзрядної обробки біомаси можуть сприяти і гідродинамічні, і електрокінетичні, і електростимуляційні частотно-хвильові процеси у гетерогенному середовищі. Тому першим завданням було дослідження можливості формування імпульсного коронного розряду, який реалізує таку комплексну дію на обох видах електродних систем. Перед початком роботи з біомасою необхідно було встановити такі можливості взагалі, для чого і застосовувався модельний соляний розчин, який відображає питому електропровідність σ_0 натуральної біомаси.

На рис. 2 наведено фотографії розрядів і осцилограм, отриманих з застосування різних електродних систем з однаковими розгортками і підсиленням за каналом напруги (підсилення за струмом – 2 В/діл (а); 5 В/діл(б)). Як видно, на відміну від електродної системи «С», розряд на електродній системі «G» не супроводжувався формуванням імпульсної корони, хоча амплітуди розрядних струмів близькі за значеннями. Більш коливальний характер розряду електродної системи "G" можна пояснити вищою добротністю контуру з такою електродною системою, зануреною у соляний розчин (активний низьковольтний баластний опір для неї менший). Тому надалі всі дослідження з обробки біомаси проводилися з використанням електродної системи конструкції «С» для позитивного електрода-вістря.



а



б

Рисунок 2 – Імпульсний розряд в модельному розчині на електродній системі «С» (а) і «G» (б)

Експерименти, проведені на натуральній біомасі показали, що стабілізація розряду в біомасі спостерігається при зарядних напругах $U_0 > 11$ кВ для максимальної ємності діапазону 1 мкФ і суттєво залежить від ємності накопичувача. Зі зменшенням ємності повне відтворення електричних динамічних характеристик розряду від імпульсу до імпульсу відбувається при більших значеннях U_0 і, для меншої з ємностей 0,1 мкФ, має місце при $U_0 = 15$ кВ. Недотримання таких вимог призводить навіть до наявності «холостих» розрядів, осцилограми електричних характеристики стабільних розрядів лишаються незмінними до завершення введення всієї сумарної енергії обробки даного

зразка біомаси.

На рис.3 наведено електричні і енергетичні характеристики, а в табл. 2 зведені розрахункові дані для вибраних режимів розряду (τ_p – тривалість активної фази розряду до моменту часу, коли розрядний струм на завершених процесу не перевищує 5 % від амплітудного значення; W_{tr} – енергія, що виділилася в розрядному проміжку впродовж τ_p з загальної енергії W ; N_{max} – максимальне значення миттєвої потужності N електричного розряду).

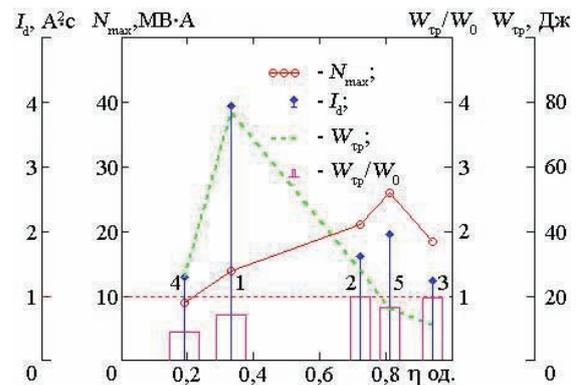


Рисунок 3 – Зведені інтегральні і амплітудні електричні характеристики різних режимів розряду

Таблиця 2 – Зведені розрахункові дані для режимів розряду

№ режиму	τ^* , мкс	η	τ_p , мкс	W_{tr}/W_0	$N_{max} \cdot 10^{-6}$, В·А
0	контрольний				
1	4,96	0,33	35	0,70	13,9
2	2,48	0,72	15	0,99	21,1
3	1,57	0,94	10	0,97	18,4
4	4,96	0,19	35	0,43	8,9
5	1,57	0,81	10	0,81	25,9

Аналіз часових залежностей розрядних струмів і напруг на міжелектродному проміжку показує, що для меншої з напруг U_0 , яка відповідає умовам забезпечення стабільних розрядів, зі зменшенням ємності накопичувача збільшується величина амплітуди струму i_p і величина η від 0,33 до 0,94 (режими №№ 1-3). Розширити діапазон режимів в бік нижньої границі і поповнити його, щодо значень η виявилось можливим шляхом змінення зарядної напруги: для максимальної ємності діапазону – в бік зменшення, для мінімальної – в бік збільшення (№ 4 і № 5). При цьому максимальна швидкість енерговведення має місце для $\eta = 0,81$.

Аналіз зведених амплітудних і інтегральних характеристик основних режимів імпульсного коронного розряду в біомасі (рис. 3) свідчить, що залежність амплітуди потужності розряду від величини η може бути екстремальною. Екстремум залежності $N_{max}(\eta)$ може не відповідати умовам максимального відносного енерговиділення (W_{tr}/W_0) протягом активної фази розряду. Інтеграл дії електричного струму одиничного розряду, розрахований на підставі експериментальних даних з виразу (6)

$$I_d = \int_0^{\tau_p} i_p(t)^2 dt, \tag{6}$$

набуває максимального значення за умови $\eta = 0,33$ (режим № 1), що відповідає максимальній енергії в абсолютних одиницях, яка виділилася впродовж активної фази розряду.

Висновки

Високовольтний імпульсний коронний розряд, який можна реалізувати у широкому діапазоні електропровідності гетерогенного біологічного середовища з високим вмістом твердофазних дисперсних включень у рідині, який характеризується значною гідродинамічною дією і струмами розтікання, що охоплюють значний об'єм і створюють помірний розподілений градієнт електромагнітного поля, є цілком прийнятним для обробки біомаси в промислових масштабах з метою її підготовки до метаногенезу. Доцільність застосування високовольтної електророзрядної обробки біомаси підтверджується техніко-економічними розрахунками, за якими прибуток від приросту утвореного біогазу може значно перевищувати витрати на обробку біомаси. В підготовленій відповідно до умов виробництва біогазу біомасі можуть бути реалізовані стабільні режими імпульсного коронного розряду зі значеннями η , яке визначає коливальний характер струму, від 0,2 до 0,95. Якщо розглядати електророзрядну інтенсифікацію бродіння, як наслідок електрокінетичних процесів і стохастичного резонансу – збігу власних частот імпульсів біологічного об'єкта з діапазоном частот імпульсів, індукованих від зовнішнього джерела, то показник η і інтеграл дії електричного струму одиничного розряду можуть бути ключовими з точки зору ефективного впливу на біомасу, що є предметом наступних досліджень.

Список літератури:

1. Chaturvedi V. An overview of key pretreatment processes employed for bioconversion of lignocellulosic biomass into biofuels and value added products / V. Chaturvedi, P. Verma // *Biotechnology*. – 2013. – Iss. 3 (5). – P. 415-431.
2. Momtgomery Lucy F. R. Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production / Lucy F. R. Momtgomery, G. Bochmann // *Technical Brochure, Copyright IEA Bioenergy*. – 2014. – 23 p.
3. Harmsen P. F. H. Literature Review of Physical and Chemical Pretreatment Processes for Lignocellulosic Biomass / P. F. H. Harmsen, W. J. J. Huijgen, L. M. Bermudez Lopez, R. R. C. Bakker // *Food and bio based research*. – 2010. – Iss. 13. – P. 1-49.
4. Agbor V. B. Biomass pretreatment: Fundamentals toward application / V. B. Agbor, N. Cicek, R. Sparling, A. Berlin, D. B. Levin // *Biotechnology Advances*. – 2014. – Vol. 29. – P. 675-685.
5. McCabe A. Increased efficiency of substrate utilization by exposure of the thermotolerant yeast strain, *Kluyveromyces marxianus* IMB3 to electric-field stimulation / A. McCabe, N. Barron, L. McHale, A. P. McHale // *Biotechnology Techniques*. – 1995. – Vol. 9, iss. 2. – P. 133-136.
6. Salerno M. B. Using a pulsed electric field as a pretreatment for improved biosolids digestion and methanogenesis / M. B. Salerno, H. S. Lee, P. Parameswaran, B. E. Rittmann // *Water Environment Research*. – 2009. – Vol. 81(8). – P. 831-839.
7. The Biogas Handbook: Science, Production and Applications / Edited by A. Wellinger, J. Murphy and D. Baxter. – Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi: Woodhead Publishing Limited. – 2013. – 463 p.

lishing Limited. – 2013. – 463 p.

8. Lehner A. Optimierung der Verfahrenstechnik lande wirtschaftlichere Biogasanlagen – Abschlussbericht (end-of-project report) / A. Lehner, M. Effenberger, A. Gronauer. – 2009. URL <http://www.lfl.bayern.de/ilt/umwelttechnik/13727/>.

9. Chen Y. Biostimulation by direct voltage to enhance anaerobic digestion of waste activated sludge / Y. Chen, B. Yu, C. Yin, C. Zhang, X. Dai, H. Yuan and N. Zhu // *RSC Advances*. – 2016. – Iss. 6. – P. 1581-1588.

10. Kim Dong-Hyun Influence of Applied Voltage for Bioelectrochemical Anaerobic Digestion of Sewage Sludge / Dong-Hyun Kim, Young-Chae Song, Feng Qing // *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. – 2015. – Vol. 37, iss. 9. – P. 542-549.

11. Zhao Zhiqiang Potential for direct interspecies electron transfer in an electric-anaerobic system to increase methane production from sludge digestion/ Zhiqiang Zhao, Yaobin Zhang, Liying Wang and Xie Quan // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol.5, Article number: 11094; doi:10.1038/srep11094.

12. Hunt Ryan W. Electromagnetic Biostimulation of Living Cultures for Biotechnology, Biofuel and Bioenergy Applications / Ryan W. Hunt, A. Zavalin, A. Bhatnagar, S. Chinnasamy and K. C. Das // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2009. – Vol. 10 (10). – P. 4515-4558.

13. Наумова О. В. Совершенствование электроимпульсной технологии при получении биогаза из органических отходов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве» / О. В. Наумова. – Саратов, 2005. – 28 с.

14. Эдер Б. Биогазовые установки : пер. с нем. Компании ZorgBiogas; под ред. И.А. Реддих / Б. Эдер, Х. Шульц, – 2011. – Режим доступа: http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Bio-gas_plants_Practics.pdf/.

References (transliterated):

1. Chaturvedi V., Verma P. An overview of key pretreatment processes employed for bioconversion of lignocellulosic biomass into biofuels and value added products. *Biotechnology*. 2013, issue 3(5), pp. 415-431.
2. Momtgomery Lucy F. R., Bochmann G. Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production. *Technical Brochure, Copyright IEA Bioenergy*. 2014, 23 p.
3. Harmsen P. F. H., Huijgen W. J. J., Bermudez Lopez L. M., Bakker R. R. C. Literature Review of Physical and Chemical Pretreatment Processes for Lignocellulosic Biomass, Food and biobased research. 2010, issue 13, pp. 1-49.
4. Agbor V. B., Cicek N., Sparling R., Berlin A., Levin D. B. Biomass pretreatment: Fundamentals toward application *Biotechnology Advances*. 2014, vol. 29, pp. 675-685.
5. McCabe A., Barron N., McHale L., McHale A. P. Increased efficiency of substrate utilization by exposure of the thermotolerant yeast strain, *Kluyveromyces marxianus* IMB3 to electric-field stimulation. *Biotechnology Techniques*. 1995, vol. 9, issue 2, pp. 133-136.
6. Salerno M. B., Lee H. S., Parameswaran P., Rittmann B. E. Using a pulsed electric field as a pretreatment for improved biosolids digestion and methanogenesis. *Water Environment Research*. 2009, vol. 81(8), pp. 831-839.
7. Wellinger A., Murphy J., Baxter D. *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications* Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi: Woodhead Publishing Limited. 2013, 463 p.
8. Lehner A., Effenberger M., Gronauer A., Optimierung der Verfahrenstechnik lande wirtschaftlichere Biogasanlagen - Abschlussbericht (end-of-project report), 2009. Available at: <http://www.lfl.bayern.de/ilt/umwelttechnik/13727/> (accessed

03.06.2016).

9. Chen Y., Yu B., Yin C., Zhang C., Dai X., Yuan H., Zhu N. Biostimulation by direct voltage to enhance anaerobic digestion of waste activated sludge. RSC Advances. 2016, issue 6, pp. 1581-1588.

10. Kim Dong-Hyun, Song Young-Chae, Qing Feng Influence of Applied Voltage for Bioelectrochemical Anaerobic Digestion of Sewage Sludge. Journal of Korean Society of Environmental Engineers. 2015, vol.37, issue 9, pp. 542-549.

11. Zhao Zhiqiang, Zhang Yaobin, Wang Liying, Quan Xie Potential for direct interspecies electron transfer in an electric-anaerobic system to increase methane production from sludge digestion. Scientific Reports. 2015, vol.5, Article number: 11094; doi:10.1038/srep11094.

12. Hunt Ryan W., Zavalin A., Bhatnagar A., Chinnasamy S., Das K. C. Electromagnetic Biostimulation of Living

Cultures for Biotechnology, Biofuel and Bioenergy Applications. International Journal of Molecular Sciences. 2009, vol.10(10), pp. 4515-4558.

13. Naumova O. V. Sovershenstvovanie jelektoimpul'snoj tehnologii pri poluchenii biogaza iz organicheskikh othodov avto-ref. dis. na soiskanie uch. stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.20.02 "Jelektrotehnologii i jelektooborudovanie v sel'skom-hozjajstve" [Perfection of electropulse technology in obtaining biogas from organic waste Abstract of a thesis dr. tech. sci. diss. 05.20.02 "Electrotechnologies and electrical equipment in agriculture"]. Saratov, 2005. 28 p.

14. Jeder B., Shul'c H. Biogas plants: per. s nem. Kompanii ZorgBiogas; po red. I. A. Reddih, 2011. Available at: http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas_plants_Practics.pdf (accessed 12.05.2016).

Надійшла (received) 15.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Обладнання та режими для електророзрядної обробки біомаси / С. В. Петриченко, П. Л. Цолін, А.В.Сінчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 69-74. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Оборудование и режимы для электроразрядной обработки биомассы / С. В. Петриченко, П. Л. Цолін, А.В.Сінчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 69-74. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Equipment and regimes for electrodischarge processing of biomass / S. V. Petrichenko, P.L. Tsolin, A.V.Synchuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 69-74. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Петриченко Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, (067) 887-39-30; e-mail: petrichsergey@gmail.com

Петриченко Сергей Викторович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (067) 887-39-30; e-mail: petrichsergey@gmail.com.

Petrichenko Sergey Victorovich – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine; tel.: (067) 887-39-30; e-mail: petrichsergey@gmail.com.

Цолін Павло Леонідович – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України; тел.: (093) 375-05-44; email: tsolinpasha@gmail.com.

Цолін Павел Леонидович – младший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (093) 375-05-44; email: tsolinpasha@gmail.com.

Tsolin Pavel Leonidovich – Research Assistant, Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine; tel.: (067) 514-77-78; email: tsolinpasha@gmail.com.

Сінчук Алла Вадимівна – кандидат технічних наук, вчений секретар, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України; тел.: +38(0512) 58-71-40; email: ssts@iipt.com.ua.

Сінчук Алла Вадимовна – кандидат технических наук, ученый секретарь, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: +38(0512) 58-71-40; email: ssts@iipt.com.ua.

Synchuk Alla Vadimovna – Candidate of Technical Sciences, scientific secretary, Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine; tel.: +38(0512) 58-71-40; email: ssts@iipt.com.ua.

УДК 621.316.9

С. С. РУДЕНКО

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ІСНУЮЧИХ ПРИЛАДІВ ЗОНДУВАННЯ ҐРУНТУ В РАМКАХ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

На основі розробленої методики та статистичної бази даних питомого електричного опору ґрунту було досліджено технічні характеристики приладів, найбільш поширених при виконанні вертикального електричного зондування в рамках контролю стану заземлювального пристрою. За допомогою довірчої ймовірності розроблено рекомендації щодо застосування певного приладу з відповідними характеристиками в залежності від класу напруги енергооб'єкту. Доведена необхідність розробки вітчизняного приладу, який дозволить проводити вертикальне електричне зондування ґрунту на території об'єктів класами напруги 35 – 750 кВ.

Ключові слова: вертикальне електричне зондування, заземлювальний пристрій, ґрунт, енергооб'єкт, технічні характеристики приладів.

На основании разработанной методики и статистической базы данных удельного электрического сопротивления грунта было исследовано технические характеристики приборов, наиболее распространенных при проведении вертикального электрического зондирования в рамках контроля состояния заземляющего устройства. С помощью доверительной вероятности разработаны рекомендации по применению определенных приборов, которые имеют соответствующие характеристики, в зависимости от класса напряжения энергообъекта. Доказана необходимость разработки отечественного прибора, который позволит проводить вертикальное электрическое зондирование грунта на территории объектов классами напряжения 35 – 750 кВ.

Ключевые слова: вертикальное электрическое зондирование, заземляющее устройство, ґрунт, энергооб'єкт, технические характеристики приборов.

Based on the developed methodology and the statistical database of the specific electrical resistance of the soil, the technical characteristics of the most commonly the measurement equipment used in vertical electrical sounding in the test of the state of the grounding grids were investigated. By means of confidence probability recommendations worked out on application of equipment with corresponding parameters, depending on the voltage class of energy object. Also it proved the necessity to develop a domestic the measurement equipment for vertical electrical sounding on the place of power plants with 35-750 kV voltage class.

Keywords: vertical electrical sounding, grounding grids, soil, energy object, technical parameters for equipment.

Постановка проблеми та аналіз публікацій

Для контролю стану та оцінки працездатності заземлювального пристрою (ЗП) діючих енергетичних об'єктів використовується електромагнітна діагностика (ЕМД) [1], яка передбачає проведення трьох етапів: експериментального, розрахункового та етапу видачі рекомендацій [2].

Однією з процедур, які виконуються на першому етапі, є вимір уявного питомого електричного опору (ПЕО) для визначення електрофізичних характеристик ґрунту (ПЕО шару, товщини шарів та їх кількості) методом вертикального електричного зондування (ВЕЗ). Метою ВЕЗ є визначення параметрів геоелектричної структури шляхом інжектування генератором випробувального струму та виміру падіння напруги на відповідній ділянці поверхні ґрунту.

При цьому найбільш широке використання в рамках проведення ЕМД стану ЗП отримала чотириелектродна симетрична установка або т. з. установка Веннера, яка характеризується: високим рівнем сигналу, доброю чутливістю до горизонтальних границь поділу шарів, слабкою чутливістю до вертикальних границь поділу та профільних включень (це послаблює вплив нетипових включень, що мають локальний характер та не вчиняють значного впливу на розтікання струмів з ЗП), прямою залежністю між рознесенням електродів та глибиною зондування, більш простими виразами для розрахунку уявного ПЕО.

Прилади для проведення ВЕЗ в рамках ЕМД стану ЗП характеризуються технічними та масогабарит-

ними параметрами. Крім того, важливим є наявність автономного живлення, можливість під'єднання до ПК та вологостійкість. Основними технічними характеристиками засобів вимірювання є: клас точності, вимірювальний діапазон, поріг чутливості, припустима величина опору струмового та потенційного кола і робоча частота. Робоча частота обирається відмінно від промислової для мінімізації впливу електромагнітного поля робочих струмів електроустановки.

У світі існує низка приладів для проведення ВЕЗ це як вимірювачі опору заземлення, так і спеціалізовані георозвідувальні станції. Слід зазначити, що георозвідувальні станції (наприклад, такі як GDP-3224, «СКАЛА 48», «ОМЕГА-48» та ін.) є складними технічними комплексами, спрямованими на вирішення вузьконаправлених завдань з пошуку корисних копалин або проведення археологічних робіт, й крім того, потребують зовнішнього живлення, тому їх використання в рамках ЕМД стану ЗП є недоцільним. Найбільш поширеними приладами для виконання ВЕЗ при контролі стану ЗП стали вимірювачі опору заземлення, наприклад, такі як: Ф4103-М1 та ЦС4107 вітчизняного виробництва, MRU-101 польської фірми Sonel, С.А 6460 і С.А 6470N французької фірми Chauvin Arnoux, російський ІС-20/1 тощо. При цьому ЦС4107, MRU-101, ІС-20/1 та С.А 6460 представляють собою прилади одного класу, зокрема нижня межа вимірювань $R_{l,lim}$ у них складає 0,01 Ом, тому можна розглянути лише один з них, наприклад С.А 6460. Крім того слід відзначити універсальний комплекс для діагнос-

тики стану ЗП «КДЗ-1У» розроблений в НДПКІ «Молнія» НТУ «ХП», який дозволяє проводити повний набір робіт першого етапу ЕМД стану ЗП.

Вибір того чи іншого приладу для проведення ВЕЗ ґрунту за його технічними характеристиками має базуватися на геометричних розмірах досліджуваного ЗП та значеннях уявного ПЕО, які будуть вимірюватися. В роботі [3] автором на основі статистичної бази даних ПЕО ґрунту в місцях розташування 612 енергооб'єктів України та на основі статистичного розподілу найбільшої діагоналі ЗП за класами напруги для 963 діючих енергооб'єктів України було розроблено методику формулювання вимог до технічних характеристик приладів проведення ВЕЗ в рамках ЕМД стану ЗП. Однак відсутність рекомендацій щодо застосування існуючих приладів може призвести до неможливості проведення вимірювань на достатню глибину або ж до виникнення значних похибок.

Метою даної роботи є аналіз можливості застосування існуючих приладів ВЕЗ ґрунту в рамках ЕМД на основі статистичної бази даних електрофізичних характеристик ґрунту та геометричних параметрів ЗП діючих енергооб'єктів.

Матеріали дослідження

Для визначення діапазону вимірювання приладів проведення ВЕЗ, використаємо технічні характеристики, які наведені у табл. 1, результати аналізу значень ПЕО ґрунту [4] і геометричних характеристик об'єктів [3]. Для цього необхідно обчислити максимальне ρ_{\max} та мінімальне ρ_{\min} значення ПЕО, які можливо виміряти за допомогою приладів з табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики приладів

Назва приладу	Діапазон вимірювання $R_{l, \lim} - R_{up, \lim}$, Ом	Робоча частота, Гц	Припустимий опір вимірювального кола R_c , кОм
Ф4103-М1	0 – 0,3; 0 – 1;	В межах 265 – 310	2 – потенційного, 1 – струмового
	0 – 3; 0 – 30;		6 – потенційного, 3 – струмового;
	0 – 10^2 ; 0 – $3 \cdot 10^2$; 0 – 10^3 ; 0 – $3 \cdot 10^3$; 0 – $1,5 \cdot 10^4$		12 – потенційного, 6 – струмового;
С.А 6460	$10^{-2} - 2 \cdot 10^3$	128	50
С.А 6470N	$10^{-3} - 10^5$	41 – 512	50
«КДЗ-1У»	$4 \cdot 10^{-2} - 7,5 \cdot 10^3$	57; 211; 419	1

Слід зазначити, що вимірювальний комплекс «КДЗ-1У» має широкі можливості застосування та набір функцій, зокрема, окрім проведення ВЕЗ, дозволяє виконувати: пошук реального місцезнаходження заземлювачів, розташованих під поверхнею землі, вимір опору ЗП та напруги дотику за методом малих струмів, проводити зняття додаткових характеристик для розрахунку напруги дотику. Проте громіздкість

(вага комплексу складає 8,5 кг), низьке значення припустимого опору вимірювального кола та необхідність живлення від мережі змінного струму ставлять значні обмеження у використанні його саме при проведенні ВЕЗ. Тому в подальшому «КДЗ-1У» не буде розглядатися при виконанні оцінки можливості застосування існуючих приладів.

Для знаходження вказаних ПЕО розглянемо електрод радіусом r_0 , занурений вертикально в ґрунт на глибину t . При цьому оцінку виконаємо для значення ПЕО однорідного ґрунту, в якому вказаний електрод має опір R_e [5]:

$$R_e = \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{2t}{r_0}, \quad (1)$$

Максимальне значення ПЕО ρ_{\max} , можемо обчислити двома способами. Перший спосіб – оцінити його за припустимим опором вимірювального кола R_c . Враховуючи (1) ρ_{\max} можна визначити як:

$$\rho_{\max} = \pi t R_c \left(\ln \frac{2t}{r_0} \right)^{-1}, \quad (2)$$

При визначенні ρ_{\max} були прийняті наступні значення: $r_0 = 5$ мм, $t = 0,3$ м (типів значення при проведенні ВЕЗ), R_c з табл. 1, при цьому для Ф4103-М1 було взято максимально припустимий опір струмового кола $R_c = 6$ кОм.

Другий спосіб базується на використанні значення верхньої межі вимірювання приладу.

З відомого виразу для уявного ПЕО установки Веннера [3, 5] та відстані між електродами, граничне значення вимірюваного опору R_{\lim} можна записати у вигляді:

$$R_{\lim} = \frac{\rho}{2\pi L_e}, \quad (3)$$

Згідно з (3) максимальне значення $R_{up, \lim}$ буде отримано при мініальному значенні міжелектродної відстані L_e ($L_{e \min} = 0,2$ м при ЕМД стану ЗП) та максимальному значенні ρ_{\max} , тоді ρ_{\max} визначимо за формулою:

$$\rho_{\max} = 2\pi L_{e \min} \cdot R_{up, \lim}. \quad (4)$$

Результати розрахунку максимального значення ПЕО, які можуть бути виміряні вказаними приладами, а також довірчий рівень $\gamma_{up, \lim}$ до їх застосування, наведено в табл. 2. При цьому довірчий рівень $\gamma_{up, \lim}$ було визначено шляхом порівняння розрахованого ρ_{\max} значення ПЕО з гістограмою розподілу ПЕО першого шару ґрунту, отриманої в [4], наприклад, максимальне значення ПЕО першого шару складає 9000 Ом \times м, тому для будь якого $\rho_{\max} \geq 9000$ Ом \times м довірчий рівень $\gamma_{up, \lim}$ буде становити 100 %.

Таблиця 2 – Результати розрахунку максимального значення ПЕО

Параметри оцінки	Ф4103-М1		С.А 6460		С.А 6470N	
	ПЕО, Ом \times м	$\gamma_{up, \lim}$, %	ПЕО, Ом \times м	$\gamma_{up, \lim}$, %	ПЕО, Ом \times м	$\gamma_{up, \lim}$, %
ρ_{\max} визначений за R_c	$1,18 \cdot 10^3$	98,0	$9,8 \cdot 10^3$	100,0	$9,8 \cdot 10^3$	100,0
ρ_{\max} визначений за $R_{up, \lim}$	$18,9 \cdot 10^3$	100,0	$2,5 \cdot 10^3$	99,5	$125 \cdot 10^3$	100,0

Згідно з (1) мінімальне значення $R_{l,lim}$ буде отримано при максимальному значенні міжелектродної відстані L_e , тобто $L_{e,max} = K_{VES} \cdot D$ [3], де D – максимальне значення діагоналі ЗП для відповідного класу напруги при довірчому рівні $\gamma_{l,lim} = 99\%$ та мініальному значенні ρ_{min} . Тоді ρ_{min} визначимо за формулою:

$$\rho_{min} = 2\pi L_{max} \cdot R_{l,lim} \quad (5)$$

При проведенні розрахунків, враховуючи, що питання необхідної глибини зондування не має однозначного рішення, а на практиці ЕМД стану ЗП для проведення вимірювання опору ЗП та напруги дотику використовується відстань $1,5D - 3D$, (це в цілому збігається з аналізом літературних даних наведених в [2, 3]). В роботі необхідна глибина зондування приймається рівною в межах від однієї до трьох D , тому будемо розглядати два варіанти: $K_{VES} = 1$ та $K_{VES} = 3$.

Прилад Ф4103-М1 є стрілочним, отже, нижня межа вимірювань у нього визначається найменшою ціною поділки на найменшій межі – $R_{l,lim} = 6$ МОм. Для приладів С.А 6460 і С.А 6470N використаємо значення, наведені в табл. 1. Для оцінки довірчого рівня $\gamma_{l,lim}$ застосуємо отриманий статистичний розподіл розміру ЗП за класами напруги (див. табл. 3 та гістограми, наведені в [3]).

Таблиця 3 – Статистичний розподіл розміру ЗП за класами напруги

Клас напруги U , кВ	Значення максимального розміру ЗП D , м			
	$\gamma_{l,lim} = 50\%$	$\gamma_{l,lim} = 80\%$	$\gamma_{l,lim} = 90\%$	$\gamma_{l,lim} = 99\%$
35	40	50	80	125
110	100	160	185	250
150	140	180	220	350
≥ 220	400	600	800	1250

Результати розрахунку граничних значень ПЕО ρ_{min} , які можуть вимірювати вказані прилади, а також довірчий рівень до їх застосування, наведено в табл. 4.

Використовуючи властивості ймовірностей і переходячи від довірчого рівня до довірчої ймовірності, визначимо можливість застосування вказаних приладів у залежності від класу напруги та коефіцієнту глибини зондування (див. табл. 5).

Таблиця 4 – Результати розрахунку граничних значень ПЕО

Клас напруги U , кВ	Відстань між електродами $L_e = K_{VES} \cdot D$	Ф4103-М1		С.А 6460		С.А 6470N	
		ПЕО, Ом \times м	γ , %	ПЕО, Ом \times м	γ , %	ПЕО, Ом \times м	γ , %
35	D	4,7	99,0	7,9	98,0	0,8	99,0
	$3D$	14,1	96,4	24,0	88,1	2,4	99,0
110	D	9,4	98,0	16,0	94,1	1,6	99,0
	$3D$	28,3	85,1	47,0	69,3	4,7	98,0
150	D	13,2	97,0	22,0	89,1	2,2	99,0
	$3D$	39,6	73,2	66,0	54,5	6,6	98,0
≥ 220	D	47,1	67,3	79,0	46,5	7,9	98,0
	$3D$	141,0	27,7	235,0	13,8	24,0	88,1

Згідно з результатами розрахунку та характеристиками приладів (див. табл. 1-5) можемо зробити наступні висновки, що:

– прилад С.А 6470 N дозволяє проводити вимірювання уявного ПЕО ґрунту на енергооб'єктах усіх

класів напруги;

– прилади Ф4103-М1 та С.А 6460 мають схожі області застосування та дозволяють проводити ВЕЗ ґрунту при ЕМД стану ЗП електричних підстанцій класу напруги 35 кВ і 110 кВ, а застосовувати їх при проведенні ВЕЗ для підстанцій класу напруги 220 кВ та вище не рекомендується;

– для приладу Ф4103-М1 через мале значення припустимого опору вимірювального кола, при проведенні ВЕЗ необхідно користуватися додатковими способами для зменшення опору електродів (зволожувати ґрунт поблизу електроду, розташовувати його «під кутом» для збільшення поверхні контакту з ґрунтом, використовувати груповий електрод тощо).

Таблиця 5 – Ймовірність застосування P , %

Клас напруги U , кВ	Відстань між електродами $L_e = K_{VES} \cdot D$	Ймовірність застосування P , %		
		Ф4103-М1	С.А 6460	С.А 6470N
35	D	97,0	97,5	99,0
	$3D$	94,5	87,7	99,0
110	D	96,1	93,6	99,0
	$3D$	83,4	69,0	98,0
150	D	95,1	88,7	99,0
	$3D$	71,8	54,2	98,0
≥ 220	D	66,0	46,3	98,0
	$3D$	27,2	13,8	88,1

Враховуючи зручність та простоту у використанні приладів С.А 6460 та С.А 6470N у порівнянні з Ф4103-М1 (так званий «вимір одним натисненням», відсутність необхідності установки нуля, можливість підключення до ПК), а також на порядок більшу їх вартість, виникає завдання щодо розробки портативного приладу з автономним живленням для проведення ВЕЗ вітчизняного виробництва з оптимальною ціною. Додатково враховуючи створені в [3] вимоги, прилад, що буде розроблятися, повинен мати технічні характеристики, які дозволили б охопити 99,9% ґрунтів в місцях розташування енергооб'єктів України:

– нижня межа вимірювання $R_{l,lim}$ не більше 0,1 МОм

– верхня межа вимірювання $R_{up,lim}$ не менше 7,2 кОм;

– припустимий опір вимірювального кола R_c не менше 66 кОм;

– вимірювальна частота близька до промислової.

Висновки

1 В роботі доведено, що запропонована автором методика, дозволяє не тільки сформулювати вимоги до приладів проведення ВЕЗ в рамках ЕМД стану ЗП, а й оцінити можливість застосування вже існуючих приладів в залежності від класу напруги досліджуваного енергооб'єкту.

2. Встановлено, що найбільш повно вимогам до приладів проведення ВЕЗ відповідає вимірювач С.А 6470N, який дозволяє проводити вимірювання уявного ПЕО ґрунту на енергооб'єктах усіх класів напруги України.

3. Прилади Ф4103-М1 та С.А 6460 можуть бути застосовані виключно при ЕМД стану ЗП електричних

підстанцій класами напруги 35 кВ та 110 кВ.

4. Показана необхідність створення вітчизняного приладу для проведення ВЕЗ в рамках ЕМД стану ЗП з межа вимірювання від 0,1 мОм до 7,2 кОм та опором вимірювального кола до 66 кОм.

Список літератури:

1. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009 – [Чинний від 2010-03-29]. – К. : Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с. – (Національний стандарт України).
2. Колиушко Г. М. К вопросу повышения точности расчета нормируемых параметров заземляющих устройств действующих электроустановок / Г.М. Колиушко, Д.Г. Колиушко, С.С. Руденко // Электротехника и электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 65-70. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13.
3. Руденко С. С. Технические требования к приборам для проведения вертикального электрического зондирования грунта при диагностике состояния заземляющих устройств / С. С. Руденко // Электротехника и электромеханика. – 2016. – № 5. – С. 68-73. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.12.
4. Колиушко Д. Г. Электрофизические характеристики грунта в местах расположения энергообъектов Украины / Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко, Г. М. Колиушко // Электротехника и электромеханика. – 2015. – № 3. – С. 67-72. doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10.
5. Бургсдорф В. В. Заземляющие устройства электроустановок / В. В. Бургсдорф, А. И. Якобс. – М.: Энергоатом-

издат, 1987. – 400 с.

References (transliterated):

1. Viprobuвання ta kontrol' pristroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktsiya. SOU 31.2-21677681-19:2009 [Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction. SOU 31.2-21677681-19:2009]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrainy Publ., 2010. 54 p.
2. Koliushko G. M., Koliushko D. G., Rudenko S. S. On the problem of increasing of the computation accuracy for rated parameters of active electrical installation ground grids. Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2014 no.4, pp. 65-70. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13
3. Rudenko S. S. Requirements for devices for vertical electrical sounding of soil at diagnostics of grounding devices. Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2016 no.5, pp. 68-73. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.12.
4. Koliushko D. G., Rudenko S. S. Analysis of electro-physical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine. Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2015, no.3, pp. 67-72. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10
5. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p.

Надійшла (received) 03.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз можливості застосування існуючих приладів зондування ґрунту в рамках діагностики стану заземлювального пристрою / С. С. Руденко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 75-78. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Анализ возможности применения существующих приборов зондирования грунта в рамках диагностики состояния заземляющих устройств / С. С. Руденко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 75-78. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Analysis of possibility to using existing devices for soil sensing in the diagnostics of the state of the grounding grids / S. S. Rudenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 75-78. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

Rudenko Serhij Serhiyovych – Research Assistant, NDPKI "Molniya" NTU "KhPI"; tel.: (054) 707-66-71; e-mail:serhij_rudenko@ukr.net.

УДК 621.7.044.4:621.983.5

Н. В. СТАРКОВ, Л. И. СТРЕЛКОВСКАЯ**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ**

Представлені результати експериментальних досліджень імпульсного електрогідрравлічного калібрування листових деталей з високоміцної сталі CP800, яка використовується в автомобілебудуванні. У виробництві кузовних деталей, які штампуються на механічних пресах, виникають проблеми, пов'язані з пружненням цих деталей і втратою точності їх форми після вилучення з матриці. У дослідженнях на макетних зразках показано, що ця проблема може бути вирішена введенням додаткової операції калібрування, що використовує імпульс тиску рідини, який генерується високовольтним розрядом.

Ключові слова: електрогідрравлічний, калібровка, високовольтний, розряд, тиск, пружнення, деформація, сталь, рідина, прес.

Представлены результаты экспериментальных исследований импульсной электрогидравлической калибровки листовых деталей из высокопрочной стали CP800, которая используется в автомобилестроении. В производстве кузовных деталей, которые штампуются на механических прессах, возникают проблемы, связанные с пружинением этих деталей и потерей точности их формы после извлечения из матрицы. В исследованиях на макетных образцах показано, что эта проблема может быть решена введением дополнительной операции калибровки, использующей импульс давления жидкости, который генерируется высоковольтным разрядом.

Ключевые слова: электрогидравлический, калибровка, высоковольтный, разряд, давление, пружинение, деформация, сталь, жидкость, пресс.

The results of experimental studies of pulse electrohydraulic calibration of sheet parts made of high-strength steel CP800, which is used in the automotive industry, are presented. In the production of body parts, which are formed on mechanical presses, there are problems associated with springing of these parts and the loss of accuracy of their shape after removal from the matrix. The existing methods of eliminating these drawbacks of mechanical forming are either not precise enough, or laborious, inefficient and not economical. In studies on prototypes, it is shown that this problem can be solved by introducing an additional calibration operation using a fluid pressure pulse that is generated by a high-voltage discharge. In this case, the part must be preliminarily elastically deformed in the die so that the stresses in it do not exceed the yield strength of the metal. The electrohydraulic calibration process is performed in one discharge and subsequent discharges do not increase the precision of the part. Other pulse calibration schemes are proposed that can reduce energy costs during the process.

Keywords: electrohydraulic, calibration, high voltage, discharge, pressure, springing, deformation, steel, liquid, press.

Введение. В различных отраслях машиностроения значительный объем продукции составляют изделия, содержащие как крупно-, так и малогабаритные детали, изготавливаемые штамповкой с высокой точностью из различных материалов. Влияние остаточных напряжений является одной из основных причин искажения формы и, как следствие, ухудшения эксплуатационных характеристик деталей. В этой связи возникает необходимость применения специальной технологической операции, позволяющей повысить класс точности деталей до требуемой величины, то есть калибровки.

В последние годы появилась устойчивая тенденция применения в автомобильном производстве листовых сталей с повышенными прочностными характеристиками [1]. Требования к качеству изготовления таких деталей возрастают на фоне конструктивного усложнения их формы. Такая тенденция приводит к большим проблемам в применении обычной механической штамповки, при которой неравномерность деформации материала детали напрямую связана с искажением ее формы после изготовления, обусловленного пружинением детали.

Из известных не термических технологических приемов устранения пружинения штампованных деталей наиболее распространен метод компенсации пружинения калибровкой с чеканкой углов детали.

Этот метод имеет недостаток, который заключается в том, что в одном и том же штампе в зависимости от настройки прессы может быть получена различная величина упругого пружинения [2].

В автомобилестроении используются методы, которые предусматривают штамповку с приданием детали в штампе специальной формы, например, обратный изгиб средней части детали, а повторной штамповкой за счет деформации этого участка устраняют пружинение детали [3]. Это сложный процесс устранения пружинения и он делает штамповку малопродуктивной и затратной.

По этой причине постоянно ведется поиск новых технологий и оборудования, позволяющих повысить точность штамповки деталей.

Одной из таких технологий является импульсная электрогидравлическая (ЭГ) калибровка, которая позволяет в замкнутой камере, заполненной жидкостью, создавать высоковольтные разряды с высокой удельной энергией (отношение запасаемой энергии емкостного накопителя W_0 к объему жидкости в камере $V_{ж}$), приближающейся в отдельных случаях к энергии, выделяющейся при взрыве тринитротолуола. В отличие от взрыва ЭГ калибровка позволяет регулировать интенсивность и точность приложения нагрузки к необходимым участкам детали.

Калибровка достигается за счет создания на по-

верхности детали импульсов давления высокой интенсивности. Продолжительность действия сил на заготовку исчисляется миллисекундами и, вследствие этого, нагрузка носит импульсный характер. Для процесса характерны высокие скорости деформирования и деформации металла заготовки, что влияет на напряженно-деформированное состояние металла. Такой характер нагрузки позволяет придавать деталям высокую точность формы при незначительной пластической деформации или даже при ее полном отсутствии, и, что более важно, стабилизировать эту форму благодаря эффективной релаксации напряжений и уменьшению их неравномерности в детали.

Эти качества импульсной ЭГ калибровки создают хорошие возможности для дальнейшего расширения сферы ее использования.

Цель исследований. Показать на макетных образцах возможность импульсной ЭГ калибровки деталей из высокопрочной стали, а именно, возможность устранения упругого пружинения деталей после механической штамповки и повышения точности их формы.

Объектом исследований был процесс ЭГ калибровки макетных (тестовых) образцов штампованных на механическом прессе деталей, изготовленных из высокопрочной стали СР800. Как пример, на рис. 1 изображены профили деталей под номерами 1 и 2 до и после ЭГ калибровки, а размеры всех деталей до ЭГ калибровки приведены в табл. 1. Механические характеристики стали СР800 приведены в табл. 2.

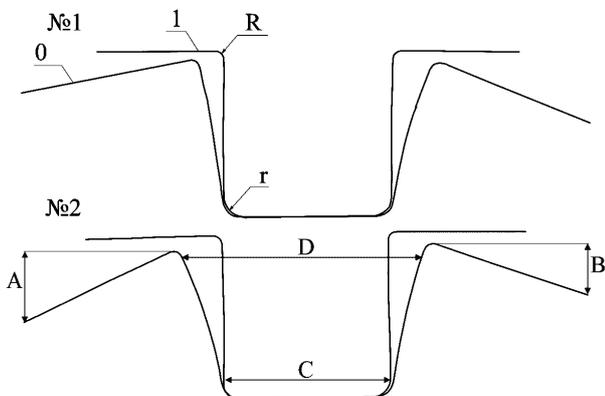


Рисунок 1 – Профили деталей:
0 - до ЭГ калибровки; 1 - после ЭГ калибровки

Таблица 1 – Размеры деталей до ЭГ калибровки

№ детали	A, мм	B, мм	A+B, мм	C, мм	D, мм
1	22	34	56	97	134
2	34	39,5	73,5	97	144
3	8,5	17	25,5	97	119
4	29	29	58	97	131
5	10	3	13	97	110
6	41	40	81	97	148
7	19	12,5	31,5	97	117
8	7	10,5	17,5	97	107
9	8	5,5	13,5	97	106,5
10	9	2	11	97	107,5
11	28	21	49	97	127
12	39	36	75	97	139

Как видно из табл. 1, все 12 образцов отличаются по форме из-за разной степени пружинения, что свидетельствует о том, что они были изготовлены при разных условиях формообразования – при разных усилиях прижима фланца, разных условиях смазки и др.

Исходная ширина полосы до механической штамповки составляла 45 мм, толщина листа – 2,03 мм.

Таблица 2 - Механические характеристики стали СР800

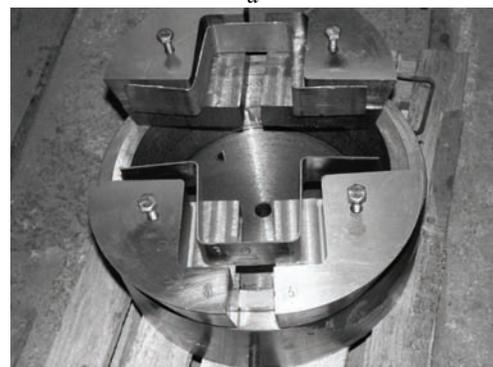
Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение после разрыва, %	Модуль упругости, нормальный, МПа
686	861	13,3	200000

Была разработана и изготовлена штамповая оснастка, которая позволяла калибровать одновременно 2 детали.

На рис. 2, а-б приведены фотографии штампа в собранном и разобранном состоянии с калибруемыми деталями.



а



б

Рисунок 2 – Штамп для ЭГ калибровки деталей:
а – в собранном состоянии, б – в разобранном состоянии

Штамп состоит из разъемной матрицы в виде 4-х вкладышей, которая зажимается в обойме по конической поверхности прижимом пресса.

На рис. 3 приведена фотография ЭГ пресса модели Т1226Б, на котором проводились эксперименты, а в табл. 3 - его основные технические характеристики [7].

Для расширения технологических возможностей ЭГ пресса в экспериментах энергия в импульсе могла

быть увеличена до 60 кДж за счет дополнительной емкости конденсаторной батареи, что обеспечивало максимальную удельную энергию разряда $W_0/V_{жс}$ до 60 Дж/см³.

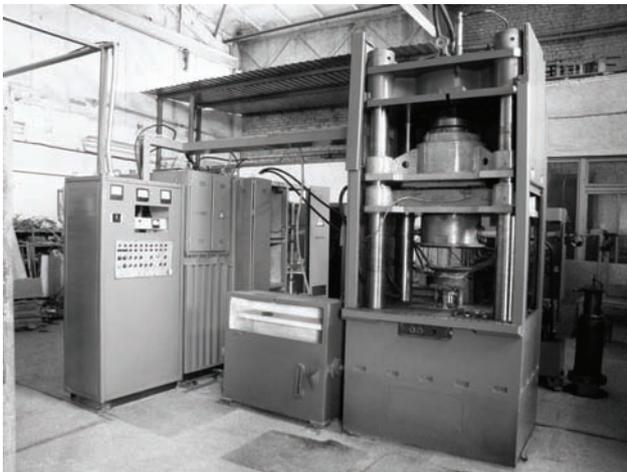


Рисунок 3 – ЭГ пресс модели T1226B

Таблица 3– Основные технические характеристики ЭГ пресса модели T1226B

Энергия в импульсе, кДж	5...40
Рабочее напряжение до, кВ	40
Частота следования импульсов, имп./с	0,25
Расстояние между колоннами в просвете, мм	800
Высота штампового пространства, мм	
– максимальная	450
– минимальная	200
Ход прижимной траверсы, мм	150
Размеры установки в плане, мм	5100x 4900
Ориентировочная производительность, дет/час	100
Масса установки, т	10

Для достижения поставленной цели экспериментальные исследования ЭГ калибровки выполняли в такой последовательности.

Обмеряли толщину стенок по длине детали, определяли ее утонение и по нему находили участки детали с наибольшей пластической деформацией. При этом было сделано предположение, что на этих участках следует ожидать наибольшие деформационное упрочнение и остаточные упругие деформации, которые приводят к пружинению и искажению формы детали. Такими участками в детали были перетяжной радиус на матрице R и угловой внутренний радиус r (см. рис. 1).

Максимальную удельную энергию приняли, исходя из расчетной величины остаточных напряжений в наружном слое заготовки $\sigma_{ост.R}$ при ее изгибе по радиусу R , которые, согласно теоремы о разгрузке [4], достигают

$$\sigma_{ост.R} = -1/2 \sigma_s, \quad (1)$$

где σ_s – напряжения текучести, МПа.

Для стали СР 800 напряжения $\sigma_s = 686$ МПа, а остаточные напряжения сжатия в стенках детали при штамповке составят $\sigma_{ост.R} = 343$ МПа.

При высоковольтном разряде в жидкости выделяющаяся энергия расходуется на работу расширения

канала, нагрев окружающей жидкости, излучение и образование продуктов распада жидкости.

При этом образуется ударная волна, максимальное давление P_m (Па) на фронте которой может быть определено по формуле [5]:

$$P_m = \frac{b(\eta) \rho_0^{3/8} U_0^{5/4} C^{1/4}}{\sqrt{r} L^{3/8} l^{5/8}}, \quad (2)$$

где $b(\eta) = 0,05 [1 - 0,8 (\eta - 0,7)^2]$; η – критерий подобия, определяющий долю энергии, выделившейся в первом полупериоде ($0,4 \leq \eta \leq 1,0$ – в зависимости от характеристик разряда); в первом приближении можно усреднять $b(\eta)$ для указанного диапазона η ;

ρ_0 – плотность рабочей жидкости, кг/м³;

U_0 – рабочее напряжение в разрядной цепи, В;

C – емкость батареи конденсаторов, Ф;

r – расстояние от канала разряда до объекта штамповки, м;

L – индуктивность разрядной цепи, Гн;

l – длина разрядного промежутка, м.

Расчет, выполненный по формуле (2), показывает, что максимальное давление на фронте ударной волны составит $P_m = 82,8$ МПа.

В разрядных камерах малого объема при расширении парогазовой полости создается импульс давления, который может быть больше давления ударной волны. Расчетное импульсное давление жидкости в разрядной камере малого объема можно определить по формуле [6]:

$$P \approx k \cdot 2,45 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{W_0}{V_{жс}}}, \quad (3)$$

где k – поправочный коэффициент, учитывающий объем жидкости в разрядной камере $V_{жс}$.

Для эксперимента при $V_{жс} = 0,9 \cdot 10^{-3}$ м³ $k = 0,7$.

При энергии в импульсе $W_0 = 60$ кДж расчетное максимальное импульсное давление в разрядной камере составит $P = 132,8$ МПа.

Как видно из приведенных расчетов, давление на фронте ударной волны более чем в 4 раза, а давление парогазовой полости более чем в 2,5 раза меньше остаточных напряжений сжатия в стенках детали. Это говорит о том, что калибровать деталь необходимо в упругодеформированном состоянии, когда в ней до ЭГ калибровки будут созданы напряжения, близкие к пределу текучести металла.

Все детали парами устанавливали в разъемную матрицу и зажимали ее усилием пресса. При этом деталь упруго деформировалась и принимала форму готовой детали. Затем разжимали матрицу, извлекали детали и проверяли их на отсутствие пластической деформации путем сравнения с исходной формой.

После опытной калибровки первых двух деталей откорректировали процесс по энергии разряда.

Партию деталей калибровали на 3-х режимах с запасаемой энергией ЭГ пресса до 40 кДж. При этом осциллографированием разрядного тока и напряжения следили за процессом ввода энергии в разрядную камеру.

В исследованиях было установлено, что высоковольтный разряд носит характер, близкий к апериодическому, при котором почти вся энергия выделяется в

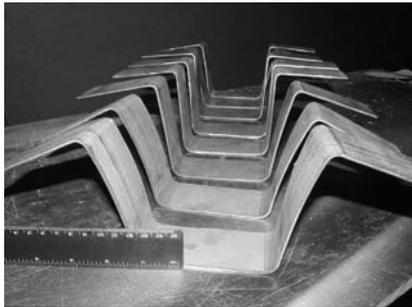
первом периоде разряда, длительность которого не превышает 100 мкс. При таких режимах разряды проходят с высокой эффективностью преобразования электрической энергии в работу пластической деформации.

На 4-х деталях выполнили дополнительно по одному разряду и обобщили результаты этих экспериментов.

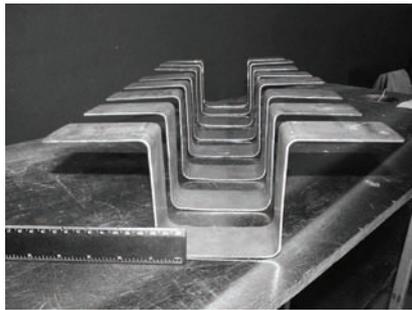
На основании выполненных ранее исследований влияния ЭГ обработки деталей на уменьшение в них уровня остаточных напряжений установили такие определяющие процесс параметры:

- параметры разрядного контура (напряжение, емкость конденсаторной батареи, длина разрядного промежутка);
- расстояние от оси канала разряда до поверхности детали;
- длительность обработки (число разрядов);
- схема нагружения;
- физико-механические свойства материала заготовки.

При осуществлении процесса ЭГ калибровки эти энергетические и технологические параметры являются основными и учитывались в проведенных экспериментах.



а



б

Рис. 4 - Фотографии деталей:
а – до ЭГ калибровки; б – после ЭГ калибровки

Обсуждение результатов исследований.

При установке матрицы с деталями в обжиме и прижме штампа прессом вкладыши матрицы плотно прилегали друг к другу и упруго деформировали деталь. Без ЭГ калибровки после разжима штампа и выемки деталей из матрицы пружинение сохранялось для всех деталей. Это говорит о том, что предварительное сжатие деталей в штампе не создавало в них пластической деформации, и последующая ЭГ калибровка выполнялась при упругой деформации деталей.

В процессе ЭГ калибровки каждую деталь на-

гружали одним импульсом, а детали № 6,7,8,9 - двумя импульсами.

Эксперименты показали, что второй импульс практически не изменяет форму детали и может даже привести к появлению «отрицательного» пружинения (пружинения внутрь детали).

На рис. 4, а-б приведены фотографии деталей до и после ЭГ калибровки.

Выводы. Экспериментально подтверждена возможность ЭГ калибровки деталей из высокопрочной стали с устранением пружинения после их деформирования механическим способом.

Исследования проводились на деталях, размеры и форма которых соответствуют общепринятым для испытаний подобного характера. Поэтому их результаты могут быть использованы для технологических процессов, в которых требуется устранение пружинения и стабилизация формы деталей.

Кроме того, необходимо отметить следующее.

1. ЭГ калибровка деталей из высокопрочных сталей должна выполняться с предварительным созданием в ней напряжений, близких к пределу текучести металла.

2. Режимы ЭГ калибровки должны учитывать исходную форму и степень пружинения калибруемой детали – чем выше степень пружинения, тем больше должна быть энергия разряда. В настоящих исследованиях минимальная запасаемая энергия при ЭГ калибровке 1 импульсом составила $W_0 = 28$ кДж, что было достаточно для деталей со средним по величине пружинением. Для деталей с большим пружинением запасаемая энергия была увеличена до 40 кДж.

3. Повторная ЭГ калибровка незначительно изменяет форму детали и может даже привести к появлению «отрицательного» пружинения (пружинения внутрь детали).

4. Для уменьшения энергетических затрат процесса возможна реализация других схем ЭГ калибровки, например, когда деталь устанавливается в матрице с зазором, который позволял бы обеспечить в ней небольшую, до 0,2 %, пластическую деформацию. Это способствовало бы выравниванию в детали деформационных напряжений и уменьшению пружинения. Эффективность ЭГ калибровки может быть увеличена, когда деталь калибруется в многоимпульсном режиме и разряды выполняются непосредственно на деталь. Это возможно в том случае, когда к качеству поверхности детали не предъявляются особые требования.

Такая информация необходима для реализации технологии ЭГ калибровки деталей в промышленных условиях.

Список литературы:

1. Старков Н.В. Импульсная ЭГШ кузовных автомобильных деталей из высокопрочных сталей / Н.В. Старков, Д.Р. Аврамец, С.Ф. Головащенко // ИПМСС Материалы IX Международной научной школы семинара (15-19 августа 2011). – Николаев: 2011. – С. 313-316.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. –

520 с.

3. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 5.0, May 2014. – P. 3-83.

4. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 280 с.

5. Кривицкий Е.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде / Е.В. Кривицкий., В.В. Шамко. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с.

6. Мазуровский Б.Я. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке / Б.Я. Мазуровский, А.Н. Сизев, -Киев: Наук. думка, 1983. 193 с.

7. Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы / М.Е. Тараненко. – Х.: Издательский центр «ХАИ», 2011. – 272 с.

References (transliterated):

1. Starkov N.V., Avramets D.R., Golovashchenko S.F. EGSh kuzovnykh avtomobilnykh detaley iz vyisokoprochnykh staley. [Impulse electrohydraulic forming of body automotive parts made of high-strength steels]. IPMSS. Materials of the IX International Scientific School of the Seminar (August 15-19,

2011). Nikolaev, 2011, pp. 313-316.

2. Romanovsky V.P. Spravochnik po holodnoy shtampovke [Reference book on cold forming]. Leningrad, Mashinostroenie, 1979. 520 p.

3. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 5.0, May 2014, pp. 3-83.

4. Popov E.A. Osnovy teorii listovoy shtampovki [Fundamentals of the theory of sheet forming]. Moscow, Mashinostroenie, 1977. 280 p.

5. Krivitsky E.V., Shamko V.V. Perekhodnyie protsessy pri vyisokovoltnom razryade v vode [Transient processes in a high-voltage discharge in water]. Kiev, Nauk. dumka, 1979. 208 p.

6. Mazurovsky B.Ya., Sizyov A.N. Elektrogidravlicheskiy effekt v listovoy shtampovke [Electrohydraulic effect in sheet forming]. Kyiv, Nauk. dumka, 1983. 193 p.

7. Taranenko M.E. Elektrogidravlicheskaya shtampovka: teoriya, oborudovanie, tekhpotsessyi [Electrohydraulic forming: theory, equipment, technical processes]. Kharkov, Izdatelskiy tsentr "KhAI" [Publishing center "KhAI"], 2011. 272 p.

Поступила (received) 06.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Експериментальне дослідження імпульсного електрогидравлічного калібрування листових деталей із високоміцної сталі / М. В. Старков, Л. І. Стрелковська // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 79-83. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Экспериментальное исследование импульсной электрогидравлической калибровки листовых деталей из высокопрочной стали / М. В. Старков, Л. И. Стрелковская // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 79-83. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Experimental studies of pulse electrohydraulic calibration of sheet parts made of high-strength steel / M. V. Starkov, L. I. Strelkovska // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 79-83. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Старков Микола Володимирович - Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, науковий співробітник; тел.: (067) 850-90-74 e-mail: starkovnikolay@yahoo.com

Старков Николай Владимирович – Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, науковий співробітник; тел.: (067) 850-90-74 e-mail: starkovnikolay@yahoo.com

Starkov Mikola Volodymyrovich – Institute of Pulse Processes and Technologies National Academy of Science of Ukraine, Nikolaev, Researcher; tel.: (067) 850-90-74 e-mail: starkovnikolay@yahoo.com

Стрелковська Людмила Іванівна – Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, провідний конструктор; тел.: (067) 549-89-48 e-mail: igorstrelk@ukr.net

Стрелковська Людмила Іванівна – Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, ведучий конструктор; тел.: (067) 549-89-48 e-mail: igorstrelk@ukr.net

Strelkovska Lyudmyla Ivanovna – Institute of Pulse Processes and Technologies National Academy of Science of Ukraine, Nikolaev, Leading Designer; tel.: (067) 549-89-48 e-mail: igorstrelk@ukr.net

УДК 621.314

О.В. ШУТЕНКО**АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ГАЗСОДЕРЖАНИЯ МАСЕЛ В БЕЗДЕФЕКТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ**

У статті, наведені результати аналізу особливостей вмісту газів в маслі бездефектних трансформаторів негерметичного виконання. Виконано аналіз розподілів газів в маслі бездефектних трансформаторів негерметичного виконання, за рівнями концентрацій та критерієм максимального газу. Проаналізовано розподіли значень швидкостей наростання і відношень пар газів. Виконано аналіз процентного вмісту газів в пробах масел бездефектних трансформаторів негерметичного виконання. Досліджено кореляційні зв'язки між газами, для проб масел з максимальним вмістом різних газів. Отримані результати дозволяють зробити висновок про наявність значних кількісних і якісних відмінностей вмісту газів в бездефектному герметичному і негерметичному маслonaповненому обладнанні.

Ключові слова: аналіз розчинених газів, рівні концентрацій, ключові гази, швидкості наростання газів, відношення газів, дифузія газів, окислення масла, нетиповий зміст газів, помилковий діагноз, кореляція.

В статье, приведены результаты анализа особенностей газосодержания трансформаторных масел в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения. Выполнен анализ распределений газов в масле бездефектных трансформаторов негерметичного исполнения по уровням концентраций и критерию максимального газа. Проанализированы распределения значений скоростей нарастания и отношений пар газов. Выполнен анализ процентного содержания газов в пробах масел бездефектных трансформаторов негерметичного исполнения. Исследованы корреляционные связи между газами, для проб масел с максимальным содержанием разных газов. Полученные результаты позволяют сделать вывод о значимых количественных и качественных различиях газосодержания масел в бездефектном герметичном и негерметичном маслonaполненном оборудовании.

Ключевые слова: анализ растворенных газов, уровни концентраций, ключевые газы, скорости нарастания газов, отношения газов, диффузия газов, окисление масла, нетипичное содержание газов, ошибочный диагноз, корреляция.

In the article, the results of the analysis of the peculiarities of the gas content of transformer oils in defect-free transformers of a non-hermetic execution are presented. Analysis of gases distributions in oil of defect-free transformers of a non-hermetic execution by concentrations levels and the criterion of key gas, is fulfilled. The distributions of the values of the rates of increase and the ratio of pairs of gases are analyzed. The percentage of gases in oil samples from defect-free transformers of a non-hermetic execution are analyzed. Correlation relations between gases, for samples of oils with the maximum content of different gases, are investigated. The obtained results allow to draw a conclusion about significant quantitative and qualitative differences in the gas content of oils in defect-free hermetic and unsealed oil-filled equipment. In particular, for non-hermetically sealed transformers, there is a low hydrogen content, which is due to the diffusion of this gas into the atmosphere. Also for non-hermetic equipment, an unusually high content of ethylene and acetylene is characteristic, which is caused by intensive oxidation of the oil under conditions of access of atmospheric oxygen. Significant influence of the design of transformers on the values of the rate of increase of gases and the ratio of gases, is established. The data given in the article allow us to conclude that it is necessary to correct the values of gas concentrations, the rates of gas build-up and gas ratios for transformers non-hermetic execution.

Keywords: dissolved gas analysis, concentration levels, key gases, rates of gas, gas ratios, gas diffusion, oil oxidation, atypical gas content, erroneous diagnosis, correlation.

Постановка проблеми. Достоверность принятия решения при использовании той или иной модели контроля будет тем выше, чем адекватней принята модель будет учитывать физические особенности диагностируемого объекта или процесса. Математические модели контроля, используемые для интерпретации результатов анализа растворенных в масле газов (АРГ), должны учитывать как количественные (значения концентраций, скоростей нарастания и отношений пар газов), так и качественные (процентное содержание отдельных газов в пробе, наличие либо отсутствие статистических связей между газами) особенности газосодержания в масле трансформаторов. Отличительной особенностью трансформаторов негерметичного исполнения, является свободный доступ к маслу кислорода-воздуха, вследствие чего помимо процессов газовой выделению в масло в таких трансформаторах имеет место и процесс диффузии газов в атмосферу. Кроме того свободный доступ кислорода-воздуха способствует интенсивному развитию окислительных

реакций, что может оказывать влияние как, на количественный так, и качественный состав растворенных в масле газов. В связи, с этим исследование особенностей газосодержания масел в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения является актуальной, научной и практически значимой задачей.

Анализ публикаций. В настоящее время анализу газосодержания масел оборудования различного конструктивного исполнения посвящено достаточное количество публикаций. Так, в работах [1-5] приведены результаты исследований, которые свидетельствуют о наличии существенных качественных и количественных отличий в газосодержании масел в герметичном и негерметичном оборудовании. В частности в [1], установлено, что на значение концентраций и состав растворенных в масле газов, кроме энергетических воздействий, существенно влияют такие факторы как доступ кислорода-воздуха и присутствие меди. В работах [1-4] приведены результаты исследований газо-

содержания масел в бездефектном негерметичном и герметичном оборудовании. Отмечается, что в негерметичном, бездефектном оборудовании практически всегда содержание этилена в масле выше, чем содержания метана и этана. Кроме того, для негерметичного оборудования наблюдается низкое содержание водорода. Результаты исследований газосодержания масел в дефектном негерметичном и герметичном оборудовании приведены в работе [5]. Однако, несмотря на большое количество публикаций, приведенные там результаты основываются на анализе ограниченного объема статистических данных (в основном результаты АРГ для Центральной ЕС Украины). Кроме того, приведенные результаты охватывают в большей степени анализ значения концентраций газов, в то время как остальные критерии, используемые для интерпретации результатов АРГ, анализируются в меньшей степени. Последние обстоятельства и послужили поводом для написания данной статьи.

Цель статьи – В статье приведены результаты анализа газосодержания масел в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения.

Результаты исследований. Для исследования газосодержания в масле бездефектных трансформаторов негерметичного исполнения использовались результаты АРГ по Донецкой, Луганской, Сумской и Харьковской областям Украины. Всего проанализированы результаты наблюдений по 426 трансформаторам напряжением 110 и 330 кВ, негерметичного исполнения. На первом этапе исследований был выполнен анализ распределений газов по значениям концентраций, для чего были использованы уровни концентраций газов, которые рекомендованы в [6] для диагностики состояния высоковольтного оборудования напряжением до 330 кВ включительно. Согласно [6] если значения концентраций газов соответствуют уровню 1, то это свидетельствует об исправном состоянии оборудования. Если концентрация хотя бы

одного из газов соответствует уровню 2, то решение о состоянии оборудования, принимается на основании анализа значений скоростей нарастания рассчитанных для суммы газов углеводородного ряда (дефект считается «присутствующим», если эта скорость превышает 30 мл/сутки). Если значения концентраций хотя бы одного из газов соответствует уровню 3, то прогнозируется наличие дефекта без учета скорости нарастания концентраций газов. Значения нормируемых уровней концентраций (выделены полужирным шрифтом) и результаты анализа приведены в табл. 1. При анализе распределений газов по уровням концентраций следует учесть, что для негерметичного оборудования концентрации газов в масле не соответствуют реально образовавшимся, из-за их диффузии в атмосферу. Диффузия газов из основного объема масла в атмосферу зависит от степени растворимости газов в масле, которая в свою очередь различна для отдельных газов и изменяется с изменением температуры. Это приводит к тому, что в атмосферу будет диффундировать, тем большее количество газа, чем меньше его растворимость. В результате, обнаруживаемые в любой из моментов времени концентрации газов в масле негерметичного оборудования отображают разницу между концентрациями выделившихся газов и концентрациями газов диффундирующих в атмосферу. При этом значения наблюдаемых концентраций может быть намного меньше, чем выделившихся [1]. Поскольку скорости диффузии газов существенно отличаются при различных температурах масла и окружающей среды для трансформаторов различной конструкции, и зависят от многих факторов [1], то оценка значений концентраций реально выделившихся газов в негерметичном оборудовании, по результатам периодического контроля, практически не возможна. В связи с этим приведенные в табл. 1, результаты отражают распределения не выделившихся газов, а разницу между выделившимися газами и газами, диффундирующими в атмосферу.

Таблица 1 – Результаты анализа распределений газов по уровням концентраций в негерметичных трансформаторах 110-330 кВ

Уровни концентраций	Газы				
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
Ниже предела обнаружения хроматографа	5161 (69,81%)	2304 (31,2%)	1957 (26,47%)	1090 (14,7%)	4551 (61,6%)
Ниже аналитического порога распознавания	0,005		0,0015		0,0003
	2106 (28,49%)	3342 (45,2%)	4485 (60,67%)	3763 (50,9%)	1602 (21,7%)
Уровень I	<0,01		<0,005		<0,00005
	71 (0,96%)	1160 (15,7%)	619 (8,37%)	-	-
Уровень II	0,01-0,015	0,005-0,012	0,0015-0,01		0,00005-0,001
	26 (0,35%)	367 (4,96%)	153 (2,07%)	1914 (25,9%)	982 (13,3%)
Уровень III	>0,015	>0,012	>0,01		>0,001
	29 (0,39%)	220 (2,98%)	179 (2,42%)	626 (8,5%)	258 (3,5%)

Анализируя данные, приведенные в табл. 1 легко увидеть, что из 7393 результатов измерения концентраций водорода 5161 значение или 69,81% не превышало предела обнаружения хроматографа. Еще 2106 значений (28,49%) концентраций водорода, не превышали значения аналитического порога распознавания (0,005% об.), регламентированного в [6]. Только 71 значение (0,96%) соответствовало уровню 1

(менее 0,01% об.). Уровню 2 (0,01-0,015% об.), соответствовали 26 значений (0,35%), а уровню 3 (более 0,015% об.) – 29 значений (0,39%).

Концентрации метана ниже предела обнаружения хроматографом выявлены в 2304 пробах масла, что составляет 31,2% всех наблюдений по данному газу, еще 3342 (45,2%) концентраций метана имели значения ниже аналитического порога распознавания

(0,0015% об.). Уровню 1 (до 0,005% об.) соответствовали 1160 значений (15,69%), уровню 2 (0,005-0,012% об.) – 367 значений (4,96%), а уровню 3 (более 0,012) – 220 значений (2,98%).

Концентрации этана не превышают предела обнаружения хроматографа в 1957 пробах (26,47%), еще в 4485 пробах масла (60,67%) концентрации этана не превышали аналитического порога распознавания (0,0015% об.). Уровню 1 (до 0,005% об.) соответствовали 619 значений, или (8,37%) уровню 2 (0,005-0,01% об.) – 153 значения (2,069%), а уровню 3 (более 0,01% об.) – 179 значений (2,42%).

Из 7393 значений концентраций этилена, ниже предела обнаружения хроматографом выявлено 1090 значений (14,74%), 3763 (50,90%) не превышали аналитического порога распознавания (который составляет 0,0015% об.). Здесь следует учесть, что для этилена значения аналитического уровня распознавания совпадает со значением верхней границы уровня 1. В связи с этим, в дальнейшем для этилена все значения соответствующие уровню 1 отнесены к значениям, не превышающим аналитического порога распознавания. В 1914 пробах, значения концентраций этилена (25,89%) соответствуют уровню 2 (0,0015-0,01% об.), а 626 значений этилена (8,47%) соответствуют уровню 3 (более 0,01% об.).

Концентрации ацетилена не превышающие предела обнаружения хроматографом выявлены в 4551 пробе масла, что составляет 61,56 % всех наблюдений по данному газу еще 1602 значения (21,67 %) концентраций ацетилена имели значения ниже аналитического порога распознавания. В связи тем, что для ацетилена уровень распознавания (0,0003 % об.) превышает верхнюю границу уровня 1 (0,00005 % об.) значения ацетилена с концентрациями выше аналитического порога распознавания, но ниже уровня 3 отнесены к уровню 2 (от 0,00005 до 0,001% об.). Уровню 2 соответствовали 982 значения (13,28 %), а уровню 3 (более 0,001 % об.) – 258 значений (3,49 %).

Несмотря на диффузию газов в атмосферу, и как следствие снижения значений наблюдаемых концентраций газов: 8,5 % концентраций этилена, 3,5 % концентраций ацетилена, 2,98 % концентраций метана, 2,4 % концентраций этана и 0,39 % концентраций водорода соответствуют уровню 3, т.е. дефектному состоянию. При этом, дефекты в данном оборудовании не обнаружены. Как показано в [7] основными причинами роста концентраций газов в исправных трансформаторах являются аварийные воздействия со стороны электрической сети, в частности, короткие замыкания и перенапряжения, а также повышение загрузки. Обобщая приведенные результаты, можно констатировать, что в трансформаторах негерметичного исполнения максимальное количество значений с концентрациями выше аналитического порога распознавания имеет C_2H_4 (2540 значений или 34,36 %). Далее следует CH_4 (1747 значений или 23,63 %), потом C_2H_2 (1240 значений или 16,77 %). Меньше всего значений с концентрациями выше аналитического порога распознавания выявлено у C_2H_6 (951 значение или 12,86 %) и H_2 (126 значений или 1,70 %).

К аналогичным выводам можно прийти, проанализировав распределение анализируемых результатов АРГ по критерию газа с максимальной концентрацией. Результаты анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Распределение результатов АРГ по газам с максимальной концентрацией.

Газ	Измерений	%
Ниже предела обнаружения	942	12,74
H_2	239	3,23
CH_4	1514	20,48
C_2H_6	381	5,15
C_2H_4	3545	47,96
C_2H_2	372	5,03
$CH_4-C_2H_4$	75	1,01
$CH_4-C_2H_6$	22	0,30
$CH_4-C_2H_2$	7	0,09
CH_4-H_2	15	0,20
$C_2H_4-C_2H_6$	66	0,89
$C_2H_4-C_2H_2$	91	1,23
$C_2H_4-H_2$	10	0,14
$C_2H_6-C_2H_2$	32	0,43
$CH_4-C_2H_4-C_2H_6$	35	0,47
$CH_4-C_2H_4-C_2H_2$	1	0,01
$CH_4-C_2H_4-H_2$	2	0,03
$CH_4-C_2H_6-C_2H_2$	3	0,04
$CH_4-C_2H_6-H_2$	1	0,01
$C_2H_4-C_2H_6-C_2H_2$	33	0,45
$C_2H_4-C_2H_6-H_2$	2	0,03
$CH_4-C_2H_4-C_2H_6-C_2H_2$	2	0,03
$CH_4-C_2H_4-C_2H_6-H_2$	3	0,04
Итого	7393	100

Как видно из табл. 2, в 942 случаях из 7393, концентрации газов углеводородного ряда и водорода отсутствовали (т.е. были ниже предела обнаружения хроматографа), это составляет 12,7 % от всего объема выборочных значений. Наибольшее число проб соответствуют максимальным концентрациям этилена – 47,96 %, далее метана – 20,48 %, затем этана – 5,15 %, ацетилена – 5,03 % и меньше всего водорода – 3,23 %. Количество проб, в которых максимальное значение концентрации имеют несколько газов, относительно невелико и составляет в сумме 5,04 % от общего количества измерений.

Поскольку в анализируемой выборке максимальное значение концентрации выявлено у всех пяти газов углеводородного ряда и водорода, то представляет интерес проанализировать, как распределены газы по уровню концентрации в пробах масел, где максимальной концентрацией обладают разные газы. Результаты анализа приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3 для проб с максимальной концентрацией водорода, подавляющее число значений концентрации газов имеют значения ниже аналитического порога распознавания либо ниже предела обнаружения. В частности из 239 проб: концентрация водорода, превышала аналитический уровень распознавания только в 33,03 %, метана в 35,96 %, этилена в 33,47 %, а ацетилена только в 7,11% всех наблюдений. Здесь следует учесть [6], что для этилена значения аналитического уровня распознавания совпадает со значением границы уровня 1, а соответствующее

Таблица 3 – Распределения газов по уровню концентраций в пробах масла с максимальной концентрацией разных газов.

Газ	Значения концентраций				
	Ниже предела обнаружения	Ниже аналитического уровня распознавания	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
Максимальная концентрация H₂					
H ₂	-	160	49	18	12
	0,000	66,946	20,502	7,531	5,021
CH ₄	13	140	69	14	3
	5,439	58,577	28,870	5,858	1,255
C ₂ H ₄	21	138	-	79	1
	8,787	57,741	0,000	33,054	0,418
C ₂ H ₆	38	184	14	1	2
	15,900	76,987	5,858	0,418	0,837
C ₂ H ₂	151	40	-	36	12
	63,180	16,736	0,000	15,063	5,021
Максимальная концентрация CH₄					
H ₂	802	686	14	4	8
	52,972	45,310	0,925	0,264	0,528
CH ₄	-	629	601	180	104
	0,000	41,546	39,696	11,889	6,869
C ₂ H ₄	92	1070	-	288	64
	6,077	70,674	0,000	19,022	4,227
C ₂ H ₆	140	986	277	53	58
	9,247	65,125	18,296	3,501	3,831
C ₂ H ₂	1115	273	-	114	12
	73,646	18,032	0,000	7,530	0,793
Максимальная концентрация C₂H₄					
H ₂	2400	1124	8	4	9
	67,701	31,707	0,226	0,113	0,254
CH ₄	984	1909	417	143	92
	27,757	53,850	11,763	4,034	2,595
C ₂ H ₄	-	1583	-	1432	530
	0,000	44,654	0,000	40,395	14,951
C ₂ H ₆	804	2383	221	55	82
	22,680	67,221	6,234	1,551	2,313
C ₂ H ₂	2012	903	-	491	139
	56,756	25,472	0,000	13,850	3,921
Максимальная концентрация C₂H₆					
H ₂	335	46	-	-	-
	87,927	12,073	0,000	0,000	0,000
CH ₄	110	182	56	20	13
	28,871	47,769	14,698	5,249	3,412
C ₂ H ₄	39	277	-	53	12
	10,236	72,703	0,000	13,911	3,150
C ₂ H ₆	-	218	86	42	35
	0,000	57,218	22,572	11,024	9,186
C ₂ H ₂	203	99	-	76	3
	53,281	25,984	0,000	19,948	0,787
Максимальная концентрация C₂H₂					
H ₂	347	25	-	-	-
	93,280	6,720	0,000	0,000	0,000
CH ₄	161	196	8	2	5
	43,280	52,688	2,151	0,538	1,344
C ₂ H ₄	49	270	-	37	16
	13,172	72,581	0,000	9,946	4,301
C ₂ H ₆	101	268	3	-	-
	27,151	72,043	0,806	0,000	0,000
C ₂ H ₂	-	80	-	205	87
	0,000	21,505	0,000	55,108	23,387

значение ацетилена приходится на уровень 2. Таким образом, можно констатировать, что в пробах с максимальной концентрацией водорода, более 60% концентраций всех газов имеют значения ниже аналитического уровня распознавания.

В пробах масла с максимальной концентрацией метана, концентрации газов, превышающие аналитический порог распознавания составили: для водорода 1,717 %, для метана 58,45 %, для этилена 23,25 %, для этана 25,62 %, и только 8,322 % для ацетилена. Из этого следует, что в пробах масла с максимальной концентрацией метана наиболее распространенными, кроме метана газами, будут являться этилен и этан.

Из всех, анализируемых газов углеводородного ряда, этан имеет одно из минимальных значений количества проб, в которых данный газ имеет максимальную концентрацию. Меньшее число проб с максимальной концентрацией только у ацетилена. Из 381 пробы с максимальной концентрацией этана концентрации газов, превышающие аналитический порог распознавания составили: для этана 42,78 %, для метана 23,36 %, для этилена 17,06 %, для ацетилена 20,73 %. Значения концентраций водорода, во всех пробах с максимальной концентрацией этана не превышали аналитического порога распознавания.

Из всех газов, наибольшее число измерений с максимальной концентрацией, приходится на этилен. Общее число таких измерений равняется 3545, что составляет 47,96 % от всего объема анализируемой выборки. Как видно из табл. 3 в пробах масла с максимальной концентрацией этилена 99,4 % концентраций водорода, 81,6 % концентраций метана, 44,65 % концентраций этилена, 89,9 % концентраций этана и 82,2 % концентраций ацетилена не превышают аналитического порога распознавания. Таким образом, из всех газов, кроме этилена, наибольший процент концентраций превышающих аналитический порог распознавания выявлен у метана, затем у ацетилена, этана и водорода.

Выполненный анализ показал, что в бездефектном оборудовании концентрации ацетилена могут превышать концентрации остальных газов. При этом, как видно из таблицы 3 в отличие, скажем от проб с максимальной концентрацией этана, процент проб с максимальной концентрацией ацетилена, в которых значения концентраций соответствуют уровню 3, составляет 23,4 %. В тоже время, значения концентраций остальных газов, практически не превышают аналитического порога распознавания. Так 100 % концентраций водорода, 96 % концентраций метана, 85,75 % концентраций ацетилена и 99,2 % концентраций этана, в пробах масла с максимальной концентрацией ацетилена, не превышают аналитического порога распознавания. Из этого следует, что принятие решение о дефектном состоянии оборудования, только на основании превышения концентрациями ацетилена значений аналитического порога распознавания, без учета значений концентраций остальных газов, как регламентировано в [6], может являться причиной ложной отбраковки оборудования.

Общее количество проб масел, в которых макси-

маленькую концентрацию имеют несколько газов, составляет 400 или 5,41 % всей анализируемой выборки. Достаточно интересным является состав проб масла, в которых максимальную концентрацию имеют несколько газов. Так, из 400 проб этилен представлен в 319 (79,95 %), этан в 198 (49,62 %), метан в 166 (41,6 %), ацетилен в 136 (34,08 %), а водород 32 (8,02 %). Отличительной особенностью проб масла, в которых максимальную концентрацию имеют несколько газов, является крайне низкие значения концентраций газов. В пробах масла с максимальной концентрацией двух газов, процент газов с концентрацией превышающей аналитический порог распознавания также небольшой. Например, из 75 проб масла, в которых газами с максимальной концентрацией являются метан и этилен только в 16 пробах (21,33 %) значения концентраций этих двух газов превышают аналитический порог распознавания.

Таким образом, при отсутствии дефектов в трансформаторах негерметичного исполнения газами с максимальной концентрацией являются в основном этилен и метан, кроме того наблюдается крайне низкое содержание водорода и этана.

Полученные результаты не совпадают с общепринятыми представлениями о содержании газов в масле бездефектного оборудования. Как правило, процесс образования газов в масле, рассматривается с точки зрения величины энергетических затрат, необходимых для разрыва тех или иных химических связей в молекулах углеводородов. При низкотемпературных воздействиях в основном образуются водород и предельные углеводороды, а непредельные углеводороды образуются только при высокотемпературных воздействиях [8]. Данный подход схематически отражает рисунок 1 [9]. Как видно из рисунка, в масле нормально работающих, исправных трансформаторов газами с максимальным содержанием должны быть водород и метан, непредельные углеводороды (этилен и ацетилен), должны отсутствовать. Из табл. 1 и 2 видно, что в негерметичных трансформаторах данная тенденция не наблюдается.

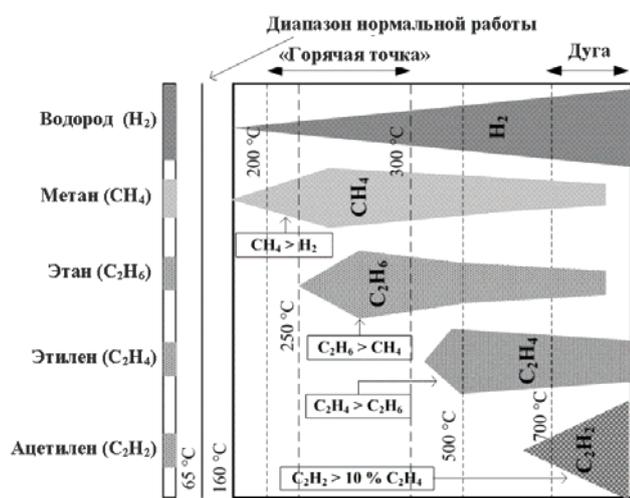


Рисунок 1 – Температурная зависимость образования газов в масле

Согласно существующим представлениям максимальное содержание водорода в масле обусловлено тем, что разрыв водородных связей происходит при меньших затратах энергии, что и наблюдается в герметичном оборудовании [1]. В тоже время, как видно из табл. 1 и 2 число проб с максимальной концентрацией водорода является минимальной по сравнению с числом проб с максимальной концентрацией других газов. Низкое содержание водорода в масле трансформаторов негерметичного исполнения может быть объяснено низким коэффициентом растворимости данного газа в масле, и как следствие миграцией большей части водорода в атмосферу вследствие процесса диффузии.

Как показано в [1-4], нетипично высокое содержание этилена в негерметичном оборудовании обусловлено тем, что при окислении трансформаторного масла атмосферным кислородом в присутствии медного катализатора образуются непредельные углеводороды в частности этилен, пропилен, 1-бутен, 2-бутен. Кроме этих газов, в относительно больших количествах образуются метан и водород, однако из-за высокой степени диффузии их содержание в масле негерметичного оборудования ограничено.

Особое внимание следует обратить на достаточно высокое количество проб с максимальным содержанием ацетилена. Согласно [6] превышение концентрациями ацетилена аналитического порога распознавания свидетельствует о наличии в оборудовании разрядов высокой энергии или зоны с температурой выше 750-800 °C. Действующая методика регламентирует, что в нормально работающем, бездефектном оборудовании ацетилен должен отсутствовать, либо иметь значения концентраций, ниже аналитического порога распознавания. Но как видно из табл. 1 и 2, несмотря на то, что количество проб с максимальной концентрацией ацетилена в общем объеме занимает предпоследнее место (меньше количество проб только с максимальной концентрацией водорода), но по количеству таких проб, сравнимо с количеством проб с максимальной концентрацией этана. В работах [2, 10] отмечено, что нетипичное, т.е. не связанное с пиролизом образование ацетилена в количестве до 0,002 % об. может происходить при температурах 12–16 °C в медицинских шприцах с никелированными деталями. Нетипичное образование ацетилена возможно и при доливке свежего масла в оборудование с большим сроком эксплуатации. В работе [2] отмечается, что нетипичное образование ацетилена может быть обусловлено расщеплением в процессе эксплуатации жидких углеводородов, уже имеющих в своем составе ацетиленовые радикалы, еще до заливки в оборудование. Образование данных радикалов может происходить при локальном высокотемпературном воздействии на трансформаторное масло в процессе его изготовления. Однако не исключается образование ацетиленовых радикалов в составе жидких углеводородов при расщеплении ароматических углеводородов в условиях воздействия рабочих температур трансформаторов. Описанные выше особенности приводят к тому, что значения диагностических критериев использу-

мых для интерпретации результатов АРГ, при диагностике негерметичного оборудования могут выходить за области значений, соответствующих исправному состоянию. В качестве примера в табл. 4, приведены

граничные (типичные) значения концентраций газов, рекомендованные наиболее известными стандартами и методиками для интерпретации результатов АРГ.

Таблица 4 – Значения концентраций растворенных в масле газов, рекомендуемые наиболее известными методиками по интерпретации результатов АРГ.

Методика	Концентрации растворенных в масле газов, % об.				
	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2
IEC 60599, [11]	0,015	0,011	0,009	0,028	0,005
IEEE Std C57.104 [12]	0,01	0,012	0,0065	0,005	0,0035
РД 153.34.0-46.302- 00 (Россия) [13]	0,01	0,01	0,005	0,01	0,001
Energopomiar (Польша) [14]	0,05	0,02	0,017	0,026	0,007
Методика Дюваля [15]	0,01	0,0075	0,0075	0,0075	0,0003
Методика Дорненбурга [16]	0,02	0,005	0,0035	0,008	0,0005
EDF, (Франция) [16]	0,013	0,013	0,015	0,0044	0,00004
BBC, (Швейцария) [16]	0,02	0,005	0,0015	0,006	0,0015
OY STROMBERG (Финляндия) [16]	0,01	0,01	0,015	0,01	0,003
HYDRO QUEBEC (Канада) [16]	0,025	0,0033	0,0015	0,004	0,0025
SECR (Япония) [16]	0,04	0,015	0,015	0,02	0,00005
California state university (США) [16]	0,1	0,008	0,0035	0,01	0,007
Northern Technology & Testing (США) [17]	0,15	0,008	0,0035	0,015	0,0007
MSZ-09-00.0352 (Малайзия) [18]	0,016	0,006	0,006	0,006	0,0004

Как видно из таблицы в большинстве из приведенных методик максимальные значения граничных концентраций регламентированы для водорода и метана. Исключение составляют методика IEC 60599, для которой максимальное граничное значение установлено для этилена, методики EDF и OY STROMBERG максимальное граничное значение установлено для этана. Но как показано выше, в негерметичном оборудовании наибольшее содержание имеют этилен и метан, а содержание водорода незначительно. При этом, как видно из табл. 1 в анализируемой выборке уровням 2 и 3, соответствуют 34,4 % значений концентраций этилена, 16,8 % ацетилена, 7,94 % метана, 4,49 % этана и только 0,74 % водорода, что может являться причиной ложной отбраковки. Количественная оценка рисков, возникающих при использовании значений граничных концентраций газов, регламентируемых известными методиками, при диагностике негерметичных трансформаторов напряжением 110 кВ, выполнена в работе [19]. В работе установлено, что минимальное значение риска, при диагностике трансформаторов негерметичного исполнения обеспечивают граничные значения, рекомендованные методикой IEC 60599, в которой максимальное граничное значение установлено именно для этилена. Приведенные результаты показывают, что граничные значения концентраций газов необходимо корректировать с учетом реального газосодержания оборудования, которое во многом обусловлено особенностями его конструктивного исполнения, в частности, для герметичного и негерметичного исполнения.

Тип защиты масла также влияет и на значения скоростей нарастания газов. Выполненный в работе [20] анализ законов распределений скоростей нарастания газов показал, что при отсутствии дефектов в трансформаторах негерметичного исполнения значения скоростей нарастания газов могут принимать, как

положительные (новообразование газов), так и отрицательные (диффузия газов из масла) значения. При этом при отсутствии внешних воздействий со стороны электрической сети имеет место симметричность распределений скоростей нарастания газов относительно математических ожиданий, что свидетельствует о том, что при нормальной эксплуатации трансформаторов имеет место некоторое равновесие между количеством образовавшегося газа и количеством газа ушедшего в атмосферу. Значения математических ожиданий скоростей нарастания для одного и того же газа при разных условиях эксплуатации изменяются незначительно, влияние эксплуатационных факторов в большей степени приводит к изменению значений дисперсии скоростей нарастания (см. рис. 2).

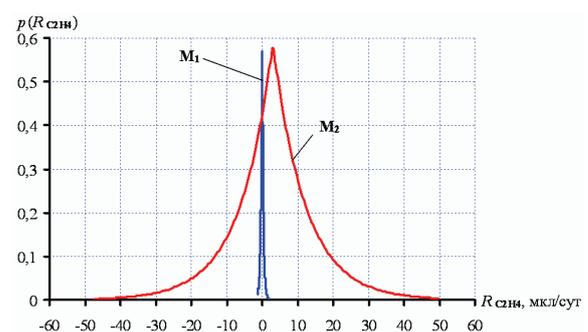
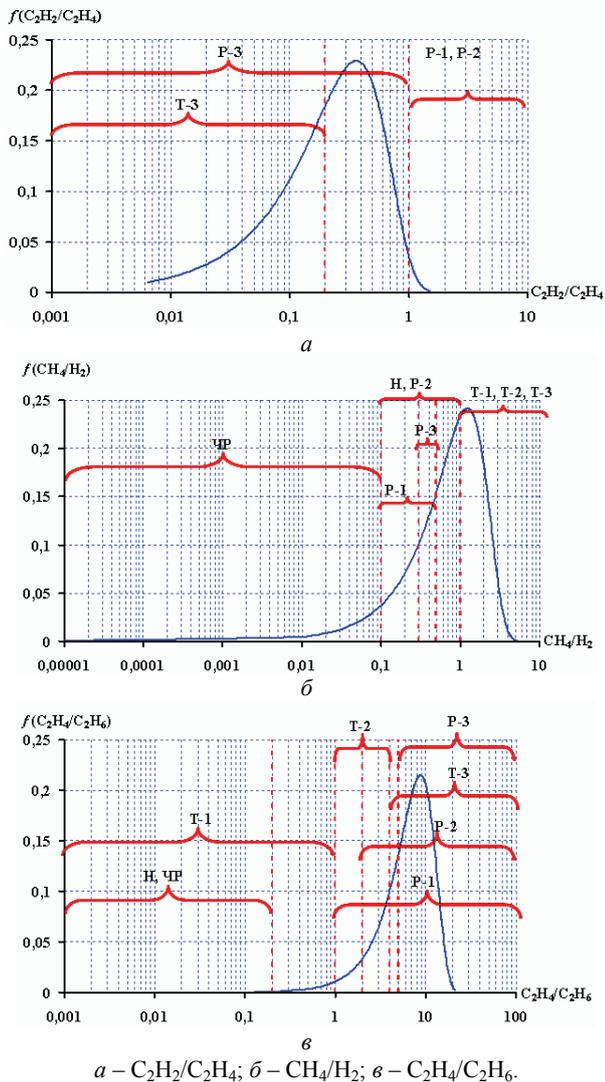


Рисунок 2 – Функции плотности теоретических распределений Лапласа для минимальных и максимальных значений скоростей нарастания этилена в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения

Кроме того, значения скоростей нарастания значительно различаются для разных газов, максимальные значения скоростей нарастания газов выявлены для этилена и метана, минимальные для водорода и ацетилена. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что граничные значения скоростей нарастания должны определяться для каждого газа в отдельности

и вероятнее всего отличаться для разных газов, в то время как в [6] регламентируется граничное значение скорости нарастания 30 мкл/сутки для суммы газов углеводородного ряда или для каждого из газов.



Н – нормальное старение; ЧП – частичные разряды; P-1 – разряды низкой энергии; P-2 – разряды высокой энергии; P-3 – ползучие разряды; T-1 – перегрев с температурой 150-300°C; T-2 – перегрев с температурой 300-700°C; T-3 – перегрев с температурой выше 700°C;
Рисунок 3 – Плотности распределения Вейбулла для отношений пар газов, полученных по результатам АРГ для бездефектных трансформаторов негерметичного исполнения ТДТН-25 110/35/10 кВ.

Достаточно интересными являются результаты анализа значений отношений пар газов, рассчитанные по результатам АРГ трансформаторов негерметичного исполнения [21]. Действующим в Украине нормативным документом [6] для бездефектных трансформаторов регламентированы следующие значения отношений пар газов: $0,1 < CH_4/H_2 < 1$, $0,2 < C_2H_4/C_2H_6$. Значение отношения C_2H_2/C_2H_4 согласно [6], является не характерным для бездефектного состояния, поскольку предполагается, что в исправных трансформаторах этилен и ацетилен отсутствуют. Однако, приведенные

в [21], результаты показывают, что при отсутствии дефекта в негерметичных трансформаторах значения отношений пар газов могут выходить за области соответствующие бездефектному состоянию. В качестве примера, на рис. 3 приведены плотности распределения Вейбулла для отношений пар газов, полученных по результатам АРГ для бездефектных трансформаторов негерметичного исполнения. Эти плотности построены по результатам АРГ для 54 трансформаторов, номинальной мощностью 25 мВА, типа ТДТН, напряжением 110/35/10 кВ. Данные трансформаторы залиты маслом марки Т-1500, объем исходной выборки составил 1076 значений. Для снижения погрешности, расчет значений отношений пар газов выполнялся только в том, случае если значения концентраций газов, по которым рассчитывалось данное отношение превышали аналитический порог распознавания. Для большей наглядности на этом же рисунке выделены области, соответствующие различным типам дефекта. Как видно из рисунка при отсутствии дефекта значения отношений пар газов, рассчитанных по результатам ХАРГ трансформаторов негерметичного исполнения, значительно отличаются от значений, регламентируемых в [6] для исправного состояния трансформаторов. При этом вероятность ложной отбраковки (вероятность ошибки I-го рода) будет определяться площадью под кривой распределения отношений пар газов для бездефектного состояния, которая ограничена значениями отношений пар газов выходящими за границы нормального состояния. В табл. 5 приведены значения коэффициентов масштаба и формы распределения Вейбулла для отношений пар газов в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения, приведенных на рис. 3. Используя значения коэффициентов масштаба и формы из табл. 5, были рассчитаны значения вероятностей попадания значений отношений пар газов для бездефектных трансформаторов негерметичного исполнения ТДТН-25 110/35/10 кВ в области соответствующие дефектам различного типа.

Таблица 5 – Значения коэффициентов масштаба α и коэффициентов формы β распределения Вейбулла для отношений пар газов в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения ТДТН-25 110/35/10 кВ

Отношение газов	α	β
C_2H_2/C_2H_4	0,395519	1,877269
CH_4/H_2	1,803012	1,931983
C_2H_4/C_2H_6	10,459705	2,669426

Полученные значения приведены в табл. 6. Значения вероятностей из табл. 6, получены путем численного интегрирования функции плотности распределения Вейбулла, путем подстановки соответствующих значений параметров формы и масштаба, для каждого из анализируемых отношений. В качестве пределов интегрирования, использовались значения границ областей отношений пар газов, характерных для того или иного типа дефекта (см. табл. 6).

Анализируя данные таблицы 6 легко увидеть, что для негерметичных трансформаторов, вероятности того, что при отсутствии дефекта, отношения пар газов будут принимать значения характерные

для бездефектного состояния имеют крайне низкие значения (0,270 о.е. для отношения CH_4/H_2 и $2,586 \cdot 10^{-5}$ о.е. для отношения $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$), что может послужить причиной ложной отбраковки трансформаторов. При этом для отношения $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ наиболее вероятными являются значения в диапазоне <1 (как видно из рис. 3– 0,2-0,3), для отношений CH_4/H_2 и $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ наиболее вероятными являются значения отношений превышающие 1. Таким образом, при отсутствии дефектов в негерметичном оборудовании значения отношений пар газов с наибольшей вероятностью соответствуют термическому дефекту с температурой выше 700°C .

Таблица 6 – Вероятности попадания значений отношений пар газов для бездефектных трансформаторов негерметичного исполнения ТДТН-25 110/35/10 кВ в области соответствующие дефектам различного типа.

Дефект	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$
Нормальное старение	Нх	0,1-1	$<0,2$
Частичные разряды	Нх	$<0,1$	$<0,2$
	-	$3,738 \cdot 10^{-3}$	$2,586 \cdot 10^{-3}$
Разряды низкой энергии	>1	0,1-0,5	>1
	$3,331 \cdot 10^{-3}$	0,077	0,998
Разряды высокой энергии	>1	0,1-1	>2
	$3,331 \cdot 10^{-3}$	0,270	0,988
Ползучие разряды	<1	0,3-0,5	>5
	0,997	0,05	0,870
Термический дефект $150-300^\circ\text{C}$	Нх	>1	<1
	-	0,726	$1,897 \cdot 10^{-3}$
Термический дефект $300-700^\circ\text{C}$	Нх	>1	1-4
	-	0,726	0,072
Термический дефект выше 700°C	$<0,2$	>1	>4
	0,243	0,726	0,926

Нх – нехарактерное отношение.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости корректировки значений отношений пар газов для оборудования негерметичного исполнения. В работе [3] для распознавания термических дефектов предлагается использовать отношение этилена к сумме газов углеводородного ряда. Рекомендуется считать, что в негерметичном оборудовании дефекты термического характера отсутствуют, если $\text{C}_2\text{H}_4/\Sigma\text{C}_x\text{H}_y \geq 79 \pm 7\%$, а в герметичном оборудовании термические дефекты отсутствуют, если $\text{C}_2\text{H}_4/\Sigma\text{C}_x\text{H}_y \leq 79 \pm 5\%$.

Еще одним критерием, используемым для диагностики состояния оборудования, является процентное содержание газов в пробах масла. Данный критерий используется как в методе ключевого газа [22], так и в треугольниках и пентаграммах Дюваля [23]. Для снижения погрешности процентное содержание газов в пробах масла, определялось только для тех проб, в которых значения газов с максимальными концентрациями превышали аналитический порог распознавания. Процентное содержание каждого из газов в пробе определялось как:

$$A_{i\%} = 100 \frac{A_i}{\Sigma}, \quad (1)$$

где: $A_{i\%}$ – процентное содержание i -того газа; A_i – значение концентрации i -того газа; Σ – сумма концентраций газов углеводородного ряда и водорода в пробе масла.

Для графического отображения полученных результатов были использованы 5-лучевые диаграммы. Для построения этих диаграмм, каждый из массивов, по газам с максимальными концентрациями разбивался на группы, в которых процентные значения содержаний отдельных газов имели близкие значения. Далее эти значения усреднялись и откладывались на диаграммах. Для удобства анализа диаграммы расположены по мере убывания, отраженных на них вероятностей процентного содержания газов.

По 79 пробам с максимальными концентрациями водорода, превышающими аналитический порог распознавания, были построены 5 диаграмм. На рис. 4 приведены четыре диаграммы, отражающие характерные процентные содержания газов в пробах масла с максимальным содержанием водорода.

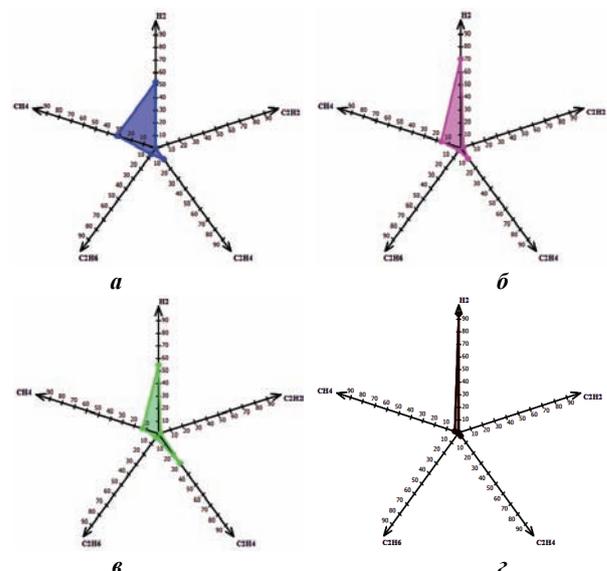


Рисунок 4 – Наиболее характерные процентные содержания газов в пробах масла с максимальным содержанием водорода

Наибольшее значение вероятности реализации 37,97% (30 проб из 79) имеет содержание газов, приведенное на рис. 4, а. Содержание газов, приведенное на диаграмме 4, б, составляет 18,9 % (15 проб из 79). Содержание газов, приведенное, на диаграмме 4-в составляет 16,45 % (13 проб из 79), на диаграмме 4-г – 13,92 % (11 проб из 79). Как видно из рисунков в пробах масла с максимальной концентрацией водорода, наибольшее процентное содержание имеют метан и этилен (до 30 %). Процентное содержание этана намного меньше и достигает в среднем порядка 15 %. В большинстве проб ацетилен, как правило, отсутствует, или имеет незначительное содержание до 10 %.

Из 885 исследуемых проб, для которых значения концентраций метана превышают аналитический порог распознавания, были получены 124 различных

комбинаций процентных содержаний газов. Однако полученные комбинации имеют разную вероятность своей реализации. На рис. 5 приведены 4 диаграммы, отражающие наиболее часто встречающееся газосодержание в пробах масел максимальной концентрации метана. Диаграмма на рис. 5, *a* встречается в 77 пробах из 885 (8,7 %), диаграмма на рис. 5, *б* встречается в 76 пробах из 885 (8,58 %) и т.д. Как видно из рисунка в пробах масла с максимальной концентрацией метана, наиболее характерными являются содержания газов, которые включают в себя 50-60 % содержания метана, 10-30 % содержания этана и этилена, и до 15 % содержания водорода. Ацетилен, как правило, отсутствует.

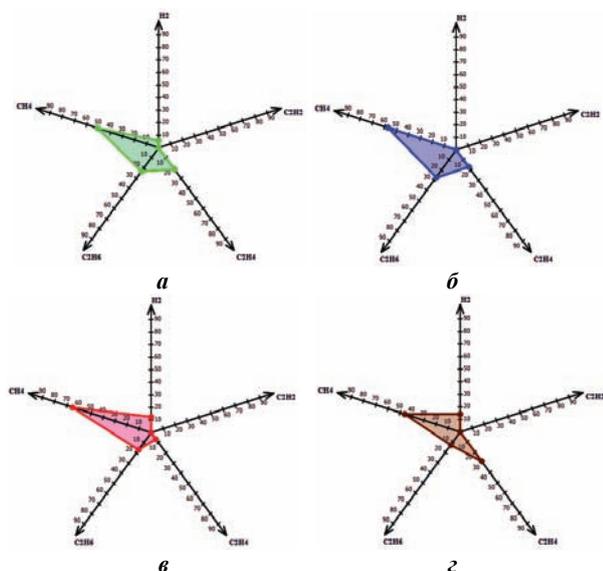


Рисунок 5 – Наиболее характерные процентные содержания газов в пробах масла с максимальным содержанием метана

Наиболее характерные процентные содержания газов в пробах масла с максимальным содержанием этана приведены на рис. 6.

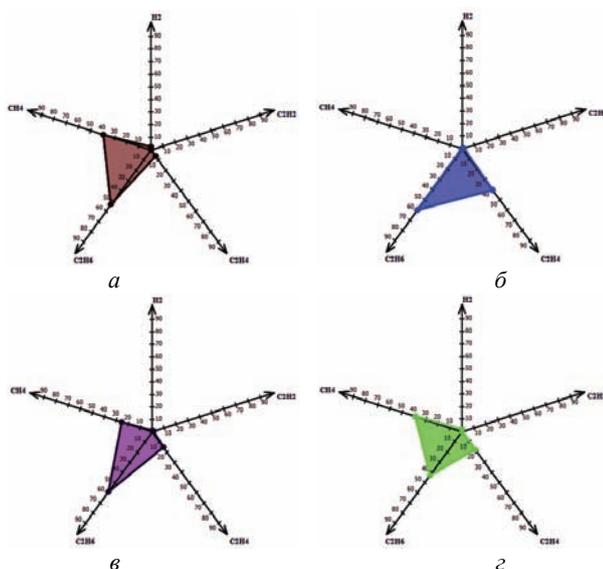


Рисунок 6 – Наиболее характерные процентные содержания газов в пробах масла с максимальным содержанием этана

Наибольшую вероятность, 24,07 % имеет процентное содержание газов отраженное на рис. 6, *a*, что составляет 39 проб из 162. Вероятность процентного содержания газов на рис. 6, *б* составляет 13,58 % 22 пробы из 162. Как видно из рисунка, кроме этана, значительное процентное содержание в пробах масла имеют метан и этилен.

Наиболее характерные процентные содержания газов в пробах масел с максимальной концентрацией этилена приведены на рис. 7.

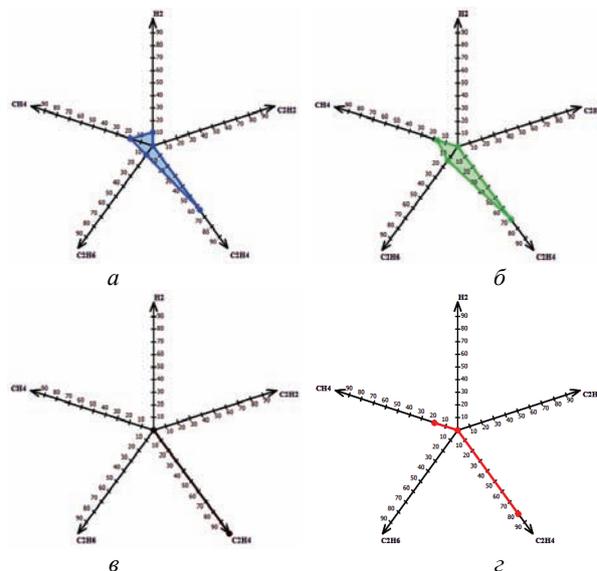


Рисунок 7 – Наиболее характерные процентные содержания газов в пробах масла с максимальным содержанием этилена.

Наибольшую вероятность, 12,18 % имеет процентное содержание газов отраженное на рис. 7-*a*, что составляет 239 проб из 1962. Вероятность процентного содержания газов на рис. 7, *б* составляет 9,48 % 186 проб из 1962. Следует отметить, достаточно высокую вероятность реализации проб масла, в которых содержание этилена носит преобладающий характер: диаграмма 7, *в* – 100 % содержания этилена имеет вероятность 6,67 % (131 проба из 1962), диаграмма на рис. 7, *г* – 95,47 % содержания этилена и 4,53 % метана, имеет вероятность реализации 1,58 % (31 проба из 1962). При этом данная тенденция характерна, как для проб масла, в которых концентрации этилена не превышают границы уровня 2, так и для тех проб, в которых концентрации этилена соответствуют уровню 3. Как видно из рис. 7 наиболее часто встречающимся газом кроме этилена является метан (20-30 %), далее идет этан (5-20 %). Водород и ацетилен встречаются намного реже, и их процентное содержание не превышает 10-15 %.

По 293 пробам, в которых концентрации ацетилена превышают аналитический порог распознавания, были построены 30 диаграмм, отражающих процентное содержание газов в пробе масла. На рис. 8 приведены 4, наиболее вероятные диаграммы, отражающие газосодержание в пробах масел максимальной концентрацией ацетилена. Наибольшую вероятность 15,4 % (45 проб) имеет содержание газов, приведенное на рис. 8, *a*. Анализируя процентные содержания газов

с рис. 8, а-г, можно сделать вывод, что в пробах масла с максимальной концентрацией ацетилена основным газом кроме C_2H_2 является этилен (до 40 %). Максимальное содержание метана, в среднем составляет 10–20 % и может достигать 40 %, но с крайне низкой вероятностью 1,37 % (4 пробы из 293). Содержание этана, в основном не превышает 20 %, только в двух пробах масла из 293, зафиксировано содержание C_2H_6 более 40 %. Водород, как правило, отсутствует. Содержание водорода, порядка 20 % выявлено в 24 пробах из 292, что составляет 8,21% от всех проб с максимальной концентрацией ацетилена.

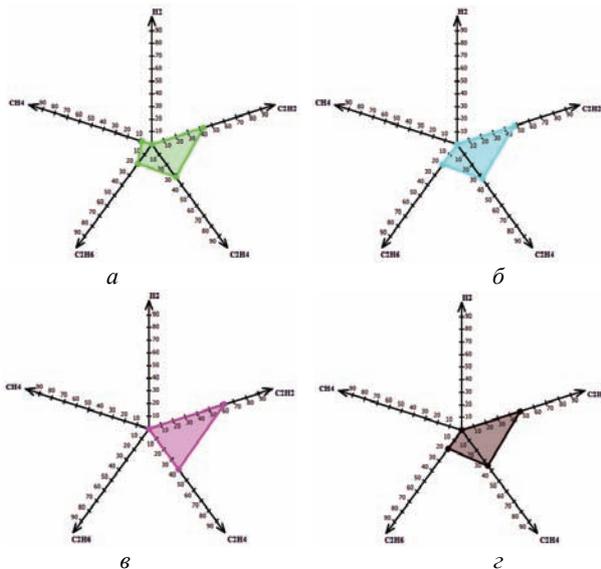


Рисунок 8 – Наиболее характерные процентные содержания газов в пробах масла с максимальным содержанием ацетилена

Обобщая полученные результаты можно сделать следующий вывод: в пробах масла из высоковольтных силовых трансформаторах негерметичного исполнения процентные содержания газов изменяются в достаточно широком диапазоне значений. При этом вероятности реализации процентных содержаний одного и того же газа значимо отличаются, т.е. отсутствует процентное содержание газов, наиболее характерное для бездефектного состояния.

При анализе процентного содержания газов было установлено, что даже в одном и том же трансформаторе газосодержание масла существенно изменяется от одной пробы к другой. Это свидетельствует о случайном, стохастическом характере изменения содержания газов в негерметичном оборудовании. Для анализа взаимовлияния между концентрациями отдельных газов было выполнено исследование тесноты корреляционных связей между газами, в пробах масла с максимальной концентрацией разных газов. Для снижения погрешности результатов, были использованы фрагменты выборки, в которых концентрации газов с максимальной концентрацией, превышали аналитический порог распознавания, но не выходили за границу уровня 2.

Оценка тесноты корреляционной связи между двумя газами выполнялась как:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

где: r – коэффициент парной корреляции; x_i, y_i – текущие значения концентраций газов; \bar{x}, \bar{y} – средние значения концентраций газов; n – объем выборочных значений.

Значения коэффициентов парной корреляции приведены в табл. 7.

Как видно из табл. 7 в пробах масла с максимальной концентрацией водорода, значение коэффициентов парной корреляции между большинством газов не превышает критического значения, что свидетельствует об отсутствии значимой связи между газами. Слабая связь выявлена только между метаном и этаном, этаном и водородом.

В пробах масла с максимальным значением концентраций метана наиболее тесная корреляционная связь выявлена между метаном-этиленом и этаном, более слабая связь имеет место между водородом и метаном, водородом и этиленом. Корреляция между остальными газами не значима. Несмотря на то, что значения коэффициентов парной корреляции для указанных газов, превышают критическое значение, связь между газами не является функциональной.

В пробах масла с максимальной концентрацией этилена, наибольшие значения коэффициентов парной корреляции получены для следующих пар газов: метан-этан, метан-водород, метан-этилен и этилен-этан. При этом значения коэффициентов парной корреляции в тех парах газов, где присутствует этилен (являющийся газом с максимальной концентрацией) меньше, значений коэффициентов парной корреляции в парах газов метан-водород-этан.

В пробах масла с максимальной концентрацией этана, значения коэффициентов парной корреляции для большинства пар газов не превышают граничного. Исключение составляют пары этан-водород, этан-метан этан-этилен и метан водород.

При отсутствии дефектов в трансформаторах, в пробах масла с максимальной концентрацией ацетилена, значимая корреляция между газами практически отсутствует. Незначительная связь выявлена между ацетиленом – этиленом и этаном.

Если проанализировать газы, между которыми выявлена слабая корреляционная зависимость, то можно выделить интересную особенность. Для всех выборок, кроме той где газом с максимальной концентрацией является ацетилен, слабая корреляционная связь выявлена между: водородом, этаном и метаном, вне зависимости от того какой из газов имеет максимальную концентрацию. Т.е., между газами характерными для нормально работающего оборудования без свободного доступа кислорода-воздуха. Слабая связь между этиленом и другими газами наблюдается в тех выборках, где максимальную концентрацию имеют газы углеводородного ряда ($CH_4, C_2H_4, C_2H_6, C_2H_2$). А вот ацетилен имеет слабую зависимость с другими газами только в выборке, где C_2H_2 , является газом с

максимальной концентрацией. При этом важно, что ацетилен слабо коррелирован с этиленом и этаном т.е., газами характерными для высокотемпературных дефектов.

Таким образом, при отсутствии дефектов в высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения, функциональная связь между газами не выявлена. В тоже время выполненные в работе [25] анало-

гичные исследования для трансформаторов с дефектами разного типа, показали наличие значимой корреляции между газами, растворенными в масле. Таким образом, наличие значимой корреляции между газами, растворенными в масле негерметичных трансформаторов, может служить дополнительным признаком наличия дефекта.

Таблица 7 – Значения коэффициентов парной корреляции между газами в пробах масла с максимальной концентрацией различных газов

Объем выборки	Газ	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
Максимальная концентрация H₂						
N=67 ρ _{крит} , 65, 0,95=0,265 [24]	H ₂	1,00	0,200	0,284	0,0652	-0,0563
	CH ₄	0,200	1,00	0,505	0,0333	-0,186
	C ₂ H ₆	0,284	0,505	1,00	0,0168	-0,1168
	C ₂ H ₄	0,0652	0,0333	0,0168	1,00	0,132
	C ₂ H ₂	-0,0563	-0,186	-0,1168	0,132	1,00
Максимальная концентрация CH₄						
N=781 ρ _{крит} , 100, 0,95=0,195 [24]	H ₂	1,00	0,237	0,0780	0,219	-0,0792
	CH ₄	0,237	1,00	0,635	0,611	0,0940
	C ₂ H ₆	0,0780	0,635	1,00	0,417	-0,108
	C ₂ H ₄	0,219	0,611	0,417	1,00	0,0938
	C ₂ H ₂	-0,0792	0,0940	-0,108	0,0938	1,00
Максимальная концентрация C₂H₄						
N=1432 ρ _{крит} , 100, 0,95=0,195 [24]	H ₂	1,00	0,407	0,080	0,135	0,097
	CH ₄	0,407	1,00	0,454	0,347	0,051
	C ₂ H ₆	0,080	0,454	1,00	0,274	-0,036
	C ₂ H ₄	0,135	0,347	0,274	1,00	0,065
	C ₂ H ₂	0,097	0,051	-0,036	0,065	1,00
Максимальная концентрация C₂H₆						
N=128 ρ _{крит} , 126, 0,95=0,195 [24]	H ₂	1,00	0,415	0,434	-0,024	0,024
	CH ₄	0,415	1,00	0,540	-0,250	-0,268
	C ₂ H ₆	0,434	0,540	1,00	0,262	-0,254
	C ₂ H ₄	-0,024	-0,250	0,262	1,00	0,042
	C ₂ H ₂	0,024	-0,268	-0,254	0,042	1,00
Максимальная концентрация C₂H₂						
N=205 ρ _{крит} , 126, 0,95=0,195 [24]	H ₂	1,00	0,028	-0,129	-0,076	0,0503
	CH ₄	0,028	1,00	0,134	0,158	0,139
	C ₂ H ₆	-0,129	0,134	1,00	0,505	0,241
	C ₂ H ₄	-0,076	0,158	0,505	1,00	0,532
	C ₂ H ₂	0,0503	0,139	0,241	0,532	1,00

Выводы

1. На основании анализа распределений газов, по уровням концентраций установлено, что в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения возможно превышение концентраций газов, граничных значений, что может быть интерпретировано как наличие дефекта. Наибольшую вероятность превышения граничного значения выявлено у этилена, потом ацетилена, метана, этана и меньше всего у водорода. Максимальное количество значений с концентрациями выше аналитического порога распознавания имеют этилен (34,36 %), метан (23,63 %), ацетилен (16,77 %). Меньше всего значений с концентрациями выше аналитического порога распознавания выявлено у этана (12,86 %) и водорода (1,70 %). В связи с этим превышение концентрациями водорода, в негерметичном оборудовании, значений уровня 1, может свидетельствовать либо о развитии дефекта, либо об аварийных режимах работы сети. В тоже время в известных стандартах по интерпретации результатов АРГ макси-

мальные значения граничных концентраций газов регламентированы для водорода и метана, что повышает риски принятия ошибочных решений.

2. Выполненный анализ выборки по критерию максимального газа позволил установить, что при отсутствии дефектов, в трансформаторах негерметичного исполнения газами с максимальной концентрацией являются в основном этилен (47,96 %) и метан (20,48 %), а вот количество проб, в которых газом с максимальной концентрацией является водород крайне мало (3,23 %). Количество проб, в которых газами с максимальной концентрацией являются ацетилен, и этан приблизительно совпадают (5,03 и 5,15 % соответственно). Подобное распределение газов существенно отличается от общепринятых представлений о газосодержании бездефектного оборудования и может быть объяснено диффузией газов в атмосферу, а также окислительными реакциями масла в присутствии атмосферного кислорода.

3. На основе анализа законов распределения от-

ношений пар газов показал, что при отсутствии дефектов в негерметичном оборудовании значения отношений пар газов с наибольшей вероятностью соответствуют термическому дефекту с температурой выше 700 °С.

4. Выполненный анализ процентного содержания газов в пробах масел бездефектных трансформаторов негерметичного исполнения, позволил установить, что процентные содержания газов изменяются в достаточно широком диапазоне значений. При этом отсутствует процентное содержание газов, наиболее характерное для бездефектного состояния.

5. На основе анализа корреляционных связей между газами, для проб масел с максимальным содержанием разных газов установлено, что при отсутствии дефектов в высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения, функциональная связь между газами отсутствует.

6. Полученные результаты позволяют сделать вывод о значимых количественных и качественных различиях газосодержания масел в бездефектном герметичном и негерметичном маслonaполненном оборудовании, а следовательно, в необходимости корректировки граничных значений концентраций газов, скоростей нарастания газов и отношений пар газов для оборудования со свободным дыханием.

Список литературы:

1. *Абрамов В.Б.* Отличительные особенности газообразования в трансформаторном масле герметичного и негерметичного высоковольтного оборудования / *В.Б. Абрамов, Г.М. Боярчуков, Р.В. Яблонский* // Новини енергетики. – 2009. – № 9. – С. 17–32.
2. *Боярчуков Г.М.* Практические проблемы оценки состояния высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле / *Г.М. Боярчуков* // Новини енергетики. – 2010. – № 7. – С. 23–33.
3. *Абрамов В.Б.* Особенности контроля маслonaполненного оборудования по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов / *В.Б. Абрамов* // Электрические сети и системы. – 2012. – № 4. – С. 77–79.
4. *Боярчуков Г.М.* Диагностика состояния негерметичного высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле / *Г.М. Боярчуков* // Энергетика та електрифікація. – 2012. – № 7. – С. 24–28.
5. *Боярчуков Г.М.* Практические проблемы оценки состояния высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле / *Г.М. Боярчуков* // Новини енергетики. – 2010. – № 10. – С. 24–33;
6. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006: Диагностика маслonaповненного трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. – К.: 2007. – 92 с.
7. *Шутенко О.В.* Анализ причин газовой выделения в силовых трансформаторах, на основе исследования корреляционных связей между растворенными в масле газами / *О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай, Т.А. Острикова, Н.Ю. Мельник* // Світлотехніка та електроенергетика. – Х.: «ХНАМГ». – 2012. – №3 – С. 72–81.
8. *Iyswarya Annapoorani K.* Fault diagnosis of power transformer based on chemical properties of insulation oil / *K. Iyswarya Annapoorani* // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. – 2015. – Vol. 7(3). – Pp. 823–828.
9. *Sukhbir Singh, Bandyopadhyay M.N.* Duval Triangle: A

Noble Technique for DGA in Power Transformers / *Sukhbir Singh, Bandyopadhyay M.N.* // International Journal of Electrical and Power Engineering. – 2010. – Vol. 4, № 3. – Pp. 193–197.

10. *Абрамов В.Б.* Влияние пробоотборников на результаты хроматографического анализа газов, растворенных в масле высоковольтного оборудования / *В.Б. Абрамов, Г.М. Боярчуков, Р.В. Яблонский* // Энергетика та електрифікація. – 2007. – №7. – С. 39–46.
11. IEC Publication 60599, Interpretation of the analysis of gases in transformer and other oil med electrical equipment in & Geneva, Switzerland, 1999.
12. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE StandARcd C57.104-2008, Feb.2009.
13. РД 153-34.0-46.302-00: Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. – Офиц. изд. М.: НЦ ЭНАС, 2001.
14. *Алексеев Б.А.* Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / *Б.А. Алексеев.* – М.: «Издательство НЦ ЭНАС», 2002. – 216 с.
15. *Saranya S.* Comparative study of various dissolved gas analysis methods to diagnose transformer faults / *S. Saranya, U. Mageswari, N. Roy, R. Sudha* // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). – 2013. – Vol. 3, iss. 3. – Pp.592 – 595.
16. *Gray I. A. R.* A Guide Transformer Oil Analysis, Transformer Chemistry Services / *I. A. R. Gray.* – <http://www.sates.co.za/Transformer Oil Analysis.pdf> (2/2013).
17. *DiGiorgio J. B.* Dissolved gas analysis of mineral oil insulating fluids / *J. B. DiGiorgio* // DGA Expert System: A Leader in Quality, Value and Experience. – 2005. – Vol. 1. – Pp. 1–17.
18. *Raisan A.* Faults diagnosis and assessment of transformer insulation oil quality: intelligent methods based on dissolved gas analysis a-review / *A. Raisan, M.M. Yaacob, M.A. Alsaedi* // International Journal of Engineering & Technology. – 2015. – Vol. 4, №. 1. – Pp. 54 – 60.
19. *Абрамов В. Б.* Порівняльний аналіз середніх ризиків, що виникають під час використання граничних значень концентрацій розчинених у маслі газів для виявлення дефектів у трансформаторах 110 кВ // *В.Б. Абрамов, О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай* // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – К.: 2014. – № 6. – С. 16–26.
20. *Шутенко О.В.* Анализ законов распределения скоростей нарастания газов в высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения / *О.В. Шутенко* // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 15 (1237). – С. 103–110.
21. *Шутенко О.В.* Анализ законов распределения отношений пар газов, рекомендуемых СОУ - Н ЕЕ 46.501 для распознавания типа дефекта в высоковольтных трансформаторах // *О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай* // Энергетика та електрифікація. – К.: 2013. – № 8. – С. 36–47.
22. *Duval M.* The duval pentagon - a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers / *M. Duval, L. Lamarre* // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2014. – Vol. 30, iss. 6. – Pp. 9-12.
23. *Ghoneim S.* Early stage transformer fault detection based on expertise method / *S. Ghoneim, N. Merabtine* // International Journal of Electrical Electronics and Telecommunication Engineering. – 2013. – Vol. 44. – Pp. 1289-1294;
24. *Большев Л.Н.* Таблицы математической статистики / *Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов.* – М.: Наука, 1965. – 464 с.
25. *Шутенко О.В.* Аналіз кореляційних зв'язків між газами, розчиненими в силових трансформаторів, при різних типах дефектів / *О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай* // Вісник НТУ

«ХІІІ». – X.: HTY «ХІІІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 166–176.

References (transliterated):

1. Abramov V.B., Bojarchukov G.M. Jablonskij R.V. Otlichitel'nye osobennosti gazoobrazovanija v transformatornom masle germetichnogo i negermetichnogo vysokovol'tnogo oborudovanija. [Distinctive features of gas formation in transformer oil of hermetic and non-hermetic high-voltage equipment]. Novini energetiki [Energy News]. 2009, no 9, pp. 17–32. (Rus).
2. Bojarchukov G.M. Prakticheskie problemy ocenki sostojanija vysokovol'tnogo oborudovanija po sodержaniju gazov v transformatornom masle. [Practical problems in assessing the state of high-voltage equipment for the gas content in transformer oil]. Novini energetiki [Energy News]. 2010, no 7, pp. 23–33. (Rus).
3. Abramov V.B. Osobennosti kontrolja maslonapolnennogo oborudovanija po rezul'tatam hromatograficheskogo analiza rastvorenyh v masle gazov. [Features of the control of oil-filled equipment based on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. Jelektricheskie seti i sistemy [Electrical networks and systems]. 2012, no 4, pp. 77–79. (Rus).
4. Bojarchukov G.M. Diagnostika sostojanija negermetichnogo vysokovol'tnogo oborudovanija po sodержaniju gazov v transformatornom masle. [Diagnosis of the state of high-voltage equipment non-hermetic execution for the content of gases in transformer oil]. Energetika ta elektrifikacija [Power engineering and electrification]. 2012, no 7, pp. 24–28. (Rus).
5. Bojarchukov G.M. Prakticheskie problemy ocenki sostojanija vysokovol'tnogo oborudovanija po sodержaniju gazov v transformatornom masle. [Practical problems in assessing the state of high-voltage equipment for the gas content in transformer oil]. Novini energetiki [Energy News]. 2010, no 10, pp. 24–33. (Rus).
6. SOU-N EE 46.501: Diagnostika maslonapovnenogo transformatornogo obladnannja za rezul'tatami hromatograficheskogo analizu vil'nih gaziv, vidibranih iz gazovogo rele, i gaziv, rozchinenih ui zoljacijnomu masli [SOU-N EE 46.501: Diagnosis oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gas with gas relay selected, i gases dissolved in insulating oil]. Kyiv: 2007, 92 p. (Ukr).
7. Shutenko O.V. Baklaj D.N., Ostrikova T.A., Mel'nik N.Ju. Analiz prichin gazovydelenija v silovyh transformatorah, na osnove issledovanija korrelyacijnyh svjazej mezhdru rastvorenyymi v masle gazami [Analysis of the causes of the evolution of gas in power transformers, based on a study of correlations between the dissolved gases in oil]. Mizhnarodnij naukovotekhnichnij zhurnal Svitlotekhnika ta Elektroenergetika, Har'kov Nacional'naja akademija gorodskogo hozjajstva imeni O.M. Beketova [The international scientific and technical journal Lighting and Electricity. Kharkiv: National University of Urban Economy in Kharkiv named after O.M. Beketov]. 2012, no.3, pp. 72–81. (Rus).
8. K. Iyswarya Annapoorani Fault diagnosis of power transformer based on chemical properties of insulation oil. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 2015, Vol. 7(3), pp. 823-828.
9. Sukhbir Singh and M.N. Bandyopadhyay Duval Triangle: A Noble Technique for DGA in Power Transformers. International Journal of Electrical and Power Engineering. 2010, Vol. 4, no3, pp. 193-197.
10. Abramov V.B., Bojarchukov G.M. Jablonskij R.V. Vlijanie probotbornikov na rezul'taty hromatograficheskogo analiza gazov, rastvorenyh v masle vysokovol'tnogo oborudovanija. [Effect of samplers on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil of high-voltage equipment]. Energetika ta elektrifikacija [Power engineering and electrification]. 2007, no 7, pp. 39–46. (Rus).
11. IEC Publication 60599, Interpretation of the analysis of gases in transformer and other oil med electrical equipment in &, Geneva, Switzerland, 1999.
12. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE StandARcd C57.104-2008, Feb.2009.
13. RD 153-34.0-46.302-00: Metodicheskie ukazanija po diagnostike razvivajushhhsja defektov transformatornogo oborudovanija po rezul'tatam hromatograficheskogo analiza gazov, rastvorenyh v masle. [RD 153-34.0-46.302-00: Guidelines for the diagnosis of developing defects in transformer equipment based on the results of the chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. Moskow: NC JeNAS, 2001, 28 p. (Rus).
14. Alekseev B.A. Kontrol' sostojanija (diagnostika) krupnyh silovyh transformatorov. [Monitoring of the condition (diagnostics) of large power transformers]. Moskow: NC JeNAS, 2002, 216 p. (Rus).
15. Saranya S., Mageswari U., Roy N., Sudha R. Comparative study of various dissolved gas analysis methods to diagnose transformer faults. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). 2013, Vol. 3., Iss. 3, pp. 592 – 595.
16. Gray I. A. R. A Guide Transformer Oil Analysis, Transformer Chemistry Services. <http://www.satcs.co.za/Transformer Oil Analysis.pdf> (2/2013).
17. DiGiorgio J. B. Dissolved gas analysis of mineral oil insulating fluids. DGA Expert System: A Leader in Quality, Value and Experience. 2005, Vol. 1, pp. 1 – 17.
18. Raisan A., Yaacob M.M., Alsaedi M.A. Faults diagnosis and assessment of transformer insulation oil quality: intelligent methods based on dissolved gas analysis a-review. International Journal of Engineering & Technology. 2015, Vol. 4, no 1, pp. 54 – 60.
19. Abramov V.B., Shutenko O.V., Baklaj D.N. Porivnjal'nij analiz srednih rizikov, shho vinikajut' pid chas vikoristannja granichnih znachen' koncentracij rozchinenih u masli gaziv dlja vijavlennja defektiv u transformatorah 110 kV [Comparative analysis of average risk using the recommended limit concentration of gases dissolved in oil for detecting defects in transformers 110 kV]. Naukovi visti nacional'nogo tehničnogo universitetu Ukraїni "Kiїvs'kij politechnij institut" [Scientific reports of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"]. Kyiv, 2014, no 6, pp 16 – 26. (Ukr).
20. Shutenko O.V. Analiz zakonov raspredelenija skorostej narastanija gazov v vysokovol'tnyh transformatorah negermetichnogo ispolnenija [Analysis of the laws of distribution of the rates of gas build-up in high-voltage transformers of a non-hermetic execution]. Vestn. Khar'k. politekhn. in-ta. Ser.: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series: High voltage engineering and electrophysics]. Kharkiv, 2017, no 15(1237), pp. 103–110. (Rus).
21. Shutenko O.V., Baklaj D.N. Analiz zakonov raspredelenija otnoshenij par gazov, rekomenduemyh SOU-N EE 46.501 dlja raspoznavanija tipa defekta v vysokovol'tnyht transformatorah [Analysis of the distribution laws of relationships couples gases recommended SOU-N EE 46.501 for the defect type detection in high voltage transformer]. Energetika ta elektrifikacija [Power engineering and electrification]. 2013, no 8, pp. 36–47. (Rus).
22. Duval M., Lamarre L. The duval pentagon - a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2014, Vol. 30, Iss. 6, pp. 9-12;
23. Ghoneim S., Merabtine N. Early stage transformer fault detection based on expertise method. International Journal of Electrical Electronics and Telecommunication Engineering. 2013, Vol. 44, pp. 1289-1294;
24. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. Tablicy matematicheskoi

statistiki. [Tables of mathematical statistics]. Moscow: Nauka, 1965, 464 p. (Rus).

25. Shutenko O.V., Baklaj D.N. Analiz koreljacijnih zv'jazkiv mizh gazami, rozchinenimi v silovih transformatoriv, pri riznih tipah defektiv. [Analysis of correlation links between gases dissolved in power transformers, for different types of

defects] Vestn. Khar'k. politekhn. in-ta. Ser.: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug [Bulletin of the Kharkiv Polytechnic Institute. Series: High voltage engineering and electrophysics]. Kharkiv, 2015, no 20(1129), pp. 166–176. (Ukr).

Поступила (received) 10.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз особливостей газомісткості масел в бездефектних трансформаторах негерметичного виконання / О.В. Шутенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 84-97. – Бібліогр.: 25 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Анализ особенностей газосодержания масел в бездефектных трансформаторах негерметичного исполнения / О.В. Шутенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 84-97. – Бібліогр.: 25 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Analysis of peculiarities of gas content of oils in defect-free transformers of untight construction / O. V. Shutenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 84-97. – Bibliogr.: 25. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шутенко Олег Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, НТУ «ХПІ», доцент кафедри «Передача електричної енергії», тел.: (057)707-66-43; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com.

Шутенко Олег Владимирович – кандидат технических наук, доцент, НТУ «ХПІ», доцент кафедры «Передача электрической энергии», тел.: (057)707-66-43; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com.

Shutenko Oleg Volodimirovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, NTU «KhPI», Associate Professor at the Department of «Electric power transmission», тел.: (057)707-66-43; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com.