

ISSN 2079-0740



ВІСНИК

Національного технічного університету
«ХПІ»

Серія: Техніка та електрофізика
високих напруг

№ 27'2019

Харків
2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCES OF UKRAINE

National technical university
"Kharkiv polytechnic institute"

ВІСНИК

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

№ 27 (1352) 2019

Збірник наукових праць
Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2019

BULLETIN

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

No. 27 (1352) 2019

Collection of Scientific papers
The edition was founded in 1961

Kharkiv
NTU "KhPI", 2019

Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2019. – № 27 (1352). – 62 с. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print)

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

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

Для преподавателей, научных сотрудников, специалистов.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

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

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

Засновник

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Головний редактор

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

Заст. головного редактора

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

Секретар

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

Редакційна колегія серії

Відповідальний редактор:

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

Відповідальний секретар:

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

Члени редколегії:

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

М. І. Бойко, д-р техн. наук, доц.;

А. Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.;

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

В. В. Князев, канд. техн. наук, ст. наук. співр.;

О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.;

Є. І. Сокол, д-р техн. наук, проф.;

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

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

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

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

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

Editor-in-chief

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

Deputy editor-in-chief

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

Secretary

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

Editorial staff

Associate editor:

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

Executive secretary:

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

Editorial staff members:

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

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

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

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

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

O. Serkov, Dr. Tech. Sci.,

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

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

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

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

Australia;

S.Grzybowski, Dr. Hab., PhD, LF IEEE, Prof. Mississippi

State University, USA;

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

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 10 від 29 листопада 2019 р.

УДК 629.424.2

С.Г. БУРЯКОВСЬКИЙ, А.С. МАСЛІЙ, Д.П. ПОМАЗАН, О.Е. САФРОНОВ, О.Г. ТУРЕНКО

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Сучасний маневровий рухомий склад повинен створюватися на базі сучасних і перспективних технологій транспортного машинобудування. Однією з таких технологій є гібридна система тягового електроприводу, в якій при обміні енергією між контактною мережею і тяговими двигунами беруть участь накопичувачі енергії.

Метою цієї статті є ознайомлення зі своїм баченням концепції перспективного маневрового локомотива з бортовим інерційним накопичувачем енергії як одним з ефективних засобів енергозбереження. Структура і технічні характеристики такого рухомого складу прийняті за результатами аналізу параметрів сучасних поїздів Європи.

Дана праця присвячена розробці математичної моделі роботи маневрового тепловозу ЧМЕЗ. Проведено дослідження, що направлені на вивчення можливості застосування гібридної силової установки на маневровому тепловозі як із базовими ДПС, так і з тяговими вентильно-індукторними двигунами (ВИД). Для цього було зроблено наступне:

- запропоновано функціональну схему гібридного локомотива;
- проведені розрахунки дизель-генераторної установки та побудована її імітаційна модель;
- розроблені функціональні схеми та імітаційні моделі накопичувачів енергії;
- ідентифіковані параметри ВИД та складена його імітаційна модель;
- розроблена імітаційна модель роботи гібридного тепловозу з можливим використанням в якості приводного ДПС або ВИД.

Ключові слова: накопичувач енергії, показник якості, область бажаності, маневровий тепловоз, гібридний локомотив, вентильно-індукторний двигун, іоністорна батарея, імітаційні моделі, зарядно-розрядні характеристики, осцилограма.

С.Г. БУРЯКОВСЬКИЙ, А.С. МАСЛІЙ, Д.П. ПОМАЗАН, О.Э. САФРОНОВ, О.Г. ТУРЕНКО

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗОВ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Современный маневровый подвижной состав должен создаваться на базе современных и перспективных технологий транспортного машиностроения. Одной из таких технологий является гибридная система тягового электропривода, в которой при обмене энергией между контактной сетью и тяговыми двигателями принимают участие накопители энергии.

Целью настоящей статьи является ознакомление со своим видением концепции перспективного маневрового локомотива с бортовым инерционным накопителем энергии как одним из эффективных средств энергосбережения. Структура и технические характеристики такого подвижного состава приняты по результатам анализа параметров современных поездов Европы.

Данная работа посвящена разработке математической модели работы маневрового тепловоза ЧМЭЗ. Проведены исследования, направленные на изучение возможности применения гибридной силовой установки на маневровом тепловозе как с базовыми ДПС, так и с тяговыми вентильно-индукторными двигателями (ВИД). Для этого было сделано следующее:

- предложено функциональную схему гибридного локомотива;
- проведены расчеты дизель-генераторной установки и построена ее имитационная модель;
- разработаны функциональные схемы и имитационные модели накопителей энергии;
- идентифицированы параметры ВИД и составлена его имитационная модель;
- разработана имитационная модель работы гибридного тепловоза с возможным использованием в качестве приводного ДПС или ВИД.

Ключевые слова: накопитель энергии, показатель качества, область желательности, маневровый тепловоз, гибридный локомотив, вентильно-индукторный двигатель, ионисторна батарея, имитационные модели, зарядно-разрядные характеристики, осциллограмма.

S.G. BURYAKOVSKY, A.S. MASLII, D.P. POMAZAN, O.E. SAFRONOV, O.G. TURENKO

ENHANCING ENERGY EFFICIENCY OF MANEUVERING DIESEL LOCOMOTIVES BY THE APPLICATION OF ENERGY STORAGE DEVICES

Modern shunting rolling stock should be created on the basis of modern and promising technologies of transport engineering. One of such technologies is a hybrid traction electric drive system, in which energy storage takes part in the exchange of energy between the contact network and traction motors.

The purpose of this article is to familiarize yourself with your vision of the concept of a promising shunting locomotive with an onboard inertial energy storage as one of the effective means of energy conservation. The structure and technical characteristics of such rolling stock are taken according to the analysis of the parameters of modern European trains.

This work is devoted to the development of a mathematical model of the work of the shunting locomotive of CHME3. Studies

have been conducted to investigate the possibility of using a hybrid powerplant on a shunting locomotive with both basic DPS and traction valve induction motors. The following was done for this purpose:

- functional diagram of hybrid locomotive is proposed;
- the calculations of the diesel generator set were carried out and its simulation model was constructed;
- functional circuits and simulation models of energy storage have been developed;
- the parameters of the species are identified and its simulation model is made;
- a simulation model of operation of a hybrid locomotive with possible use as a driving DPS or traction valve induction motors has been developed.

Keywords: energy storage, quality indicator, desirability area, shunting locomotive, hybrid locomotive, valve-induction motor, ionistor battery, simulation models, charge-discharge characteristics, oscillogram.

Постановка проблеми. Ніхто не має сумніву в необхідності заміни морально застарілого і фізично зношеного електрорухомого складу (ЕРС), що експлуатується в даний час на залізницях країни. Вочевидь, що новий рухомий склад такого призначення повинен створюватися на базі сучасних і перспективних технологій транспортного машинобудування.

Однією з таких технологій є гібридна система тягового електроприводу, в якій при обміні енергією між контактною мережею і тяговими двигунами беруть участь накопичувачі енергії.

З точки зору специфіки роботи певних накопичувачів енергії, на транспорті можливе застосування наступних їх видів: пневматичні, надпровідні індуктивні, інерційні, електрохімічні (АКБ), суперконденсатори і проточні редокс-накопичувачі. Пропоновані накопичувачі енергії можливо застосовувати, як в системах електропостачання, так і безпосередньо на рухомому складі. При цьому існують свої переваги і недоліки. Основною перевагою застосування накопичувачів енергії на рухомому складі є зменшення втрат в контактній мережі при передачі енергії від рухомого складу до накопичувачів в режимі рекуперації і назад в режимі тяги, а також автономність транспортного засобу, що особливо важливо в разі аварії в системі електропостачання, можливість його використання на стикових ділянках з різними видами електрифікації або взагалі її відсутність.

Метою роботи є проведення досліджень, що направлені на вивчення можливості застосування гібридної силової установки на маневровому тепловозі як із базовими ДПС, так і з тяговими вентиляльно-індукторними двигунами (ВІД).

Матеріали дослідження. При проведенні дослідження у якості вихідних даних взяті параметри наступних конструкційних складових тепловозу: дизель С18 ACERT, синхронний генератор ГС-500-400, акумулятор LT-LYP 770, конденсатор ИКЭ 40/96, тяговий ДПС послідовного збудження ТЕ-006 та ВІД ДВІ-165. було зроблено наступне:

- запропоновано функціональну схему гібридного локомотива;
- проведені розрахунки дизель-генераторної установки та побудована її імітаційна модель;
- розроблені функціональні схеми та імітаційні моделі накопичувачів енергії;
- ідентифіковані параметри ВІД та складена його імітаційна модель;
- розроблена імітаційна модель роботи гібридного тепловозу з можливим використанням в якості при-

водного ДПС або ВІД.

Вибір та обґрунтування функціональної схеми гібридного тепловоза. Огляд існуючих різновидів систем гібридного тягового приводу локомотивів показав, що в таких системах використовують різноманітні схеми і елементи. Виходячи з аналізу цих систем, пропонується наступна узагальнена функціональна схема гібридного маневрового тепловозу (рис. 1).

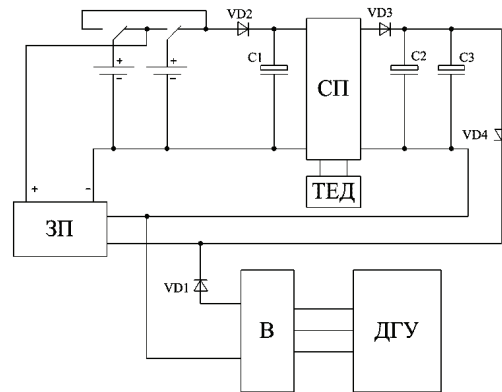


Рисунок 1 – Узагальнена функціональна схема гібридного маневрового тепловозу

Запропонована схема складається з дизель-генераторної установки ДГУ, випрямляча В, зарядного пристрою ЗП, статичного перетворювача СП, тягового двигуна ТЕД та двох накопичувачів енергії – акумуляторної та конденсаторної батареї. Дослідження роботи гібридного тепловоза пропонується виконувати з базовими ТЕД постійного струму та більш перспективними на сьогоднішній день – вентиляльно-індукторними ТЕД.

Для аналізу режимів роботи гібридного тепловозу була складена розгорнута функціональна схема, що наведена на рис. 2.

Запропонована схема складається з пульта керування ПК, статичного перетворювача СП, тягового електроприводу ТЕП, конденсаторної батареї К, зарядного пристрою ЗП, акумуляторної батареї АБ, випрямляча В, синхронного генератора Г та дизеля Д. При виконанні умови (1), що відповідає алгоритму роботи блоку вибору позиції (див. рис. 2), ПК одночасно подає сигнал на роботу СП та Д.

$$N_p = \begin{cases} N_p - 1 & \text{if } I_m > I_n \vee V_t > V_s; \\ N_p & \text{if } I_m < I_n \wedge V_s - 5 \leq V_t \leq V_s; \\ N_p + 1 & \text{if } I_m < I_n \wedge V_t < V_s - 5, \end{cases} \quad (1)$$

де N_p – номер позиції ПК;
 I_m – величина струму тягового двигуна;
 I_n – номінальний пусковий струм двигуна;
 V_t – поточна швидкість руху поїзда;
 V_s – задана швидкість за тахограмою.

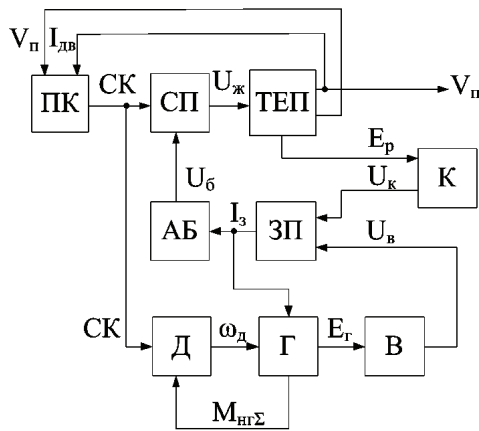


Рисунок 2 – Розгорнута функціональна схема гібридного тепловозу

СП живиться від АБ, заряд якої відбувається через ЗП, який, в свою чергу, може отримувати живлення як від К, так і від Г через В. К заряджається при режимі рекуперативного гальмування та віддає свою енергію при досягненні певного рівня напруги, що відповідає номінальному значенню для роботи ЗП. При низькому рівні напруги на К та розрядженій АБ її живлення здійснюється від Д-Г. В якості ТЕП може виступати як привід постійного, так і змінного струмів.

Вхідними параметрами для блоку ПК є швидкість поїзда V_n та струм двигуна $I_{дв}$, від величин яких залежить сигнал керування СК, який є вхідною величиною для Д і СП. В залежності від СК (тобто номера позиції контролера машиніста) СП визначає рівень напруги живлення ТЕП $U_{ж}$. СП, в свою чергу, отримує вхідну величину напруги U_6 від АБ. ТЕП може працювати як в тяговому режимі, так і в режимі рекуперативної. Вихідними величинами блока ТЕП є швидкість поїзда V_n , струм двигуна $I_{дв}$ (в тяговому режимі) та Е.Р.С. E_p (в режимі рекуперативної). В залежності від величин напруг U_k та U_6 ЗП видає величину струму заряду I_3 , який поступає в АБ та Г. Вхідними величинами блоку Г є значення швидкості дизеля $\omega_{дв}$ та струму I_3 , а вихідними – Е.Р.С. генератора E_2 та моменту навантаження $M_{нг\sigma}$, яке є вхідною величиною для Д.

Математичне моделювання системи Г-Д. Було встановлено, що час використання локомотива на номінальну потужність складає 29 % від загального добового часу експлуатації. Виконавши відповідні розрахунки, було визначено кількість енергії, що витрачається за добу експлуатації локомотива, яка складає 3,48 МВт·год. Виходячи з цього, сумарна добова кількість енергії, що виробляється дизель-генераторною установкою, повинна перевищувати загальнодобову затрачену кількість енергії. А тому в запропонованій системі (див. рис.1) в якості прототипу застосований новий дизель виробництва фірми Caterpillar C18

ACERT, що зображений на рис. 3, а його технічні характеристики приведені в табл. 1.

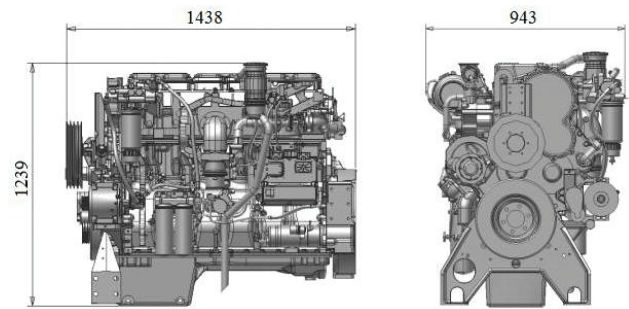


Рисунок 3 – Дизель C18 ACERT

Таблиця 1 – Технічні характеристики дизеля C18 ACERT

Параметр	Значення
Максимальна потужність, кВт	597
Мінімальна потужність, кВт	429
Номінальна частота обертання, об/хв	1800-2100
Конфігурація двигуна	6-циліндровий, 4-тактний
Маса, кг	1673

Двигуни C18 ACERT потужністю 429-522 кВт (575-700 л.с.) при частоті обертання 1800-2100 об/хв. відповідають вимогам стандартів на викид забруднюючих речовин Stage II Китаю, EPA Tier 3 та EC Stage IIIA або еквівалентних їм.

Діаграма роботи дизеля C18 ACERT наведена на рис. 4.

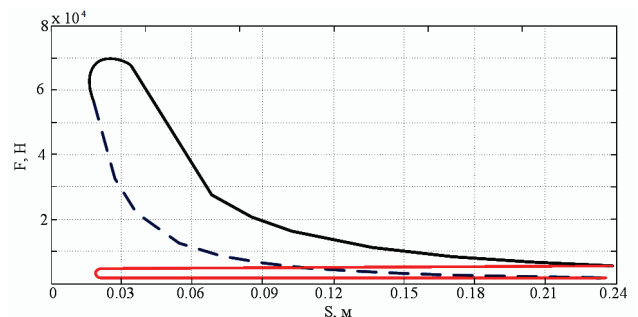


Рисунок 4 – Діаграма роботи дизеля C18 ACERT



Рисунок 5 – Генератор ГС-200-400

Відповідно потужності запропонованого дизеля обрано синхронний генератор з постійними магнітами марки ГС-200-400. Його загальний вид представлений на рис. 5, а технічні характеристики зведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Технічні характеристики дизеля ГС-200-400

Параметр	Значення
Потужність, кВт	200
Напруга, В	400
Номинальний струм, А	900
Кількість фаз	3
З'єднання фаз	зірка
Частота обертання, об/хв.	2000

Імітаційне моделювання генератора виконано за допомогою блоку Synchronous Machine pu Standart з розділу SimPowerSystems програмного комплексу Matlab.

Імітаційне моделювання накопичувачів енергії. Для забезпечення безперервної роботи тепловоза сумарна добова кількість енергії, яку повинен віддавати накопичувач енергії становити не менше 30 % від загальних добових витрат енергії [6]. З огляду на це в якості прототипів накопичувачів енергії на тепловозі застосовані акумулятор LT-LYP 770 (рис. 6) та іоністор ІКЭ 40/96 (рис. 7), технічні характеристики яких приведені у табл. 3 та 4 відповідно.

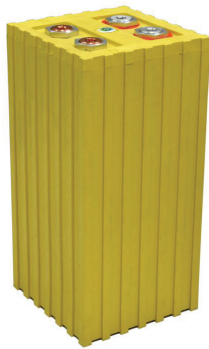


Рисунок 6 – Акумулятор LT-LYP 770



Рисунок 7 – Іоністорна батарея ИКЭ 40/96

Таблиця 3 – Основні технічні характеристики акумулятора LT-LYP 770

Параметр	Значення
Номинальна ємність, А·год.	770
Номинальна напруга, В	3,2
Питома енергія по масі, Вт · год/кг	105
Ресурс при глибині розрядки 80%, циклів	3000
Саморозряд при зберіганні, % в місяць	< 3
Робота при температурі, °С	від -40 до +50
Маса, кг	9,95

Таблиця 4 – Технічні характеристики ИКЭ 40/96

Параметр	Значення
Напруга, В	110
Ємність, Ф	8,5
Вага, кг	34
Довжина, мм	400
Робота при температурі, °С	від -45 до +50

Оскільки номінальна напруга акумулятора LT-LYP 770 складає 3,2 В, то для живлення ТЕД необхідно 65 послідовно з'єднаних акумуляторів з загальною напругою 198В. Паралельне з'єднання накопичувачів дозволяє отримати великі пускові струми, а також уникнути просадок за струмом при збільшенні навантажень на накопичувач. З метою підтримання номінального струму двигунів пропонується використовувати 3 паралельні гілки.

Іоністорна батарея повинна, з одного боку, забезпечувати можливість накопичення енергії під час рекуперативного гальмування, а з іншого – підтримувати вихідну напругу в діапазоні, що відповідає номінальному рівню для роботи зарядного пристрою [4, 6].

Як відомо, робота акумуляторної батареї відбувається за зарядно-розрядною характеристикою. Для обраного акумулятора розрядна та зарядна характеристики представлені на рис. 8 та рис. 9 відповідно.

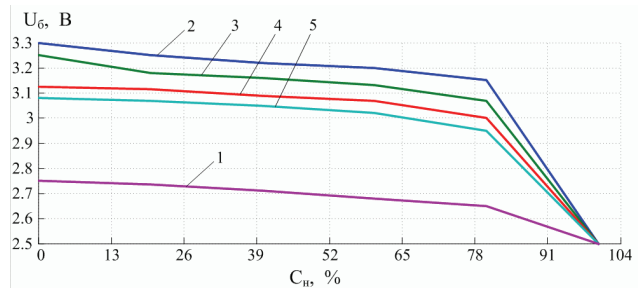


Рисунок 8 – Розрядні характеристики акумулятора LT-LYP 770 для режимів 1, 2, 3, 4, 5

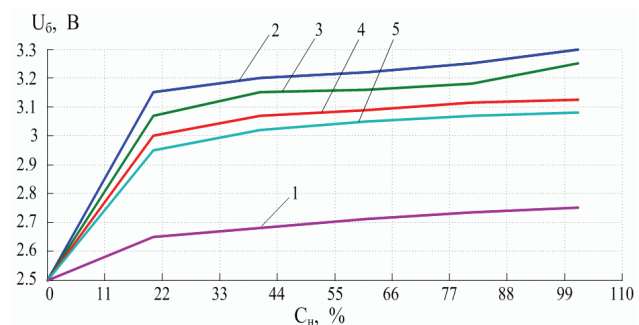


Рисунок 9 – Зарядні характеристики акумулятора LT-LYP 770

Значення сили струму C обраного акумулятора складає 770 А. Функціональна схема накопичувача енергії LT-LYP 770 представлена на рис. 10.

Дана функціональна схема включає в себе чотири основних блока: БВР, БРР, БЗР та БСРАБ. На вхід БВР подаються три величини струмів: струм двигуна у тяговому режимі $I_{де}$, струм двигуна у режимі рекуперативної $I_{рек}$ та зарядний струм від синхронного генератора I_c . В залежності від їх значень БВР вибирає заря-

дний або розрядний режим роботи АБ. БРР та БЗР відпрацьовують задані характеристики (див. рис. 8 і 9) та видають сигнали U_3 і U_p , які відповідають певному рівню напруги АБ, що, в свою чергу, залежать від ампер-годин її роботи у режимі заряду AG_3 та розряду AG_p , а також від величини розрядного I_p і зарядного I_3 струмів. БСРАБ узгоджує між собою два вхідних сигнали U_3 і U_p та видає результуюче значення напруги U_6 АБ.

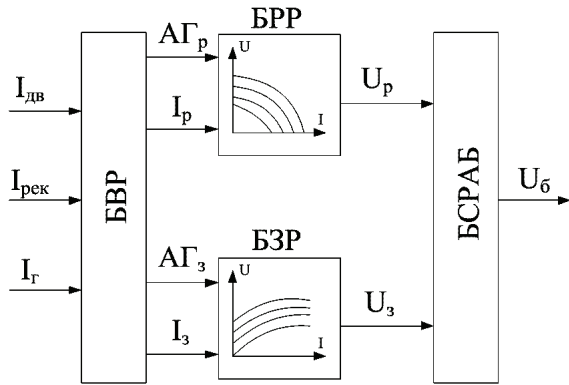


Рисунок 10 – Функціональна схема моделі акумуляторної батареї: БВР – блок вибору режиму роботи батареї, БЗР – блок, що реалізує режим заряду, БРР – блок, що реалізує режим розряду, БСРАБ – блок синхронізації режимів роботи АБ

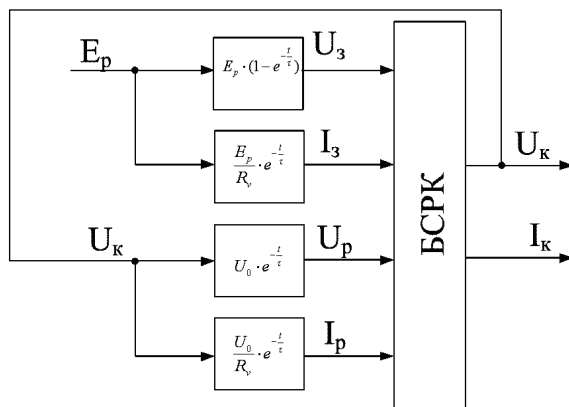


Рисунок 11 – Функціональна схема моделі іоністора

Моделювання іоністора виконувалося на основі наступних рівнянь:

– напруга заряду конденсатора

$$U_3 = E_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (2)$$

де E_p – Е.Р.С. двигуна в режимі рекуперації;

t – час заряду конденсатора;

τ – стала часу,

– зарядний струм

$$I_3 = \frac{E_p}{R_v} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3)$$

де R_v – опір зарядного контуру,

– напруга розряду конденсатора

$$U_p = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4)$$

де U_0 – початковий розрядний рівень напруги,

– розрядний струм

$$I_p = \frac{U_0}{R_v} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5)$$

Функціональна схема, що відображає роботу конденсатора наведена на рис. 11.

Використовуючи рівняння (2) та (4) були отримані значення напруг U_3 і U_p та струмів I_3 і I_p , які є вхідними величинами для БСРК. БСРК, в свою чергу, узгоджує між собою ці сигнали та видає результуюче значення напруги U_k та струму I_k конденсатора [2].

Результати імітаційного моделювання роботи гібридного тепловоза з двигуном постійного струму

На основі загальної функціональної схеми (див. рис. 2) та функціональних схем окремих блоків (АБ (див. рис. 10), К (див. рис. 11) в середовищі Matlab було складено імітаційну модель роботи гібридного тепловоза, де був застосований тяговий двигун постійного струму з широтно-імпульсною системою керування.

При дослідженні роботи гібридного тепловозу на імітаційній моделі задавались тахограми з максимальними швидкостями в інтервалі 40-80 км/год з кроком 10 км/год. На рис. 12-16 показані осцилограми роботи гібридного тепловоза з 10 вагонами на профілі шляху, що зображений кривою 5, при різних максимальних швидкостях.

Модель руху поїзда розроблена на основі структурної схеми (рис. 15) з використанням профілю, що відповідає ділянці шляху Харків-Мерефа У запропонованій моделі була врахована можливість переходу тягових двигунів у генераторний (рекуперативний) режим з метою накопичення енергії на іоністорах. Рекуперативне гальмування використовувалося до швидкості 10 км/год, з подальшим догальмовуванням пневматичним гальмом.

Для підтримання поточної швидкості (крива 2) по заданій тахограмі (крива 1) машиністом виконувалося регулювання напруги на тягових двигунах зміною позиції контролера машиніста (крива 3). Зміна однієї позиції відповідає зміні рівня вихідної напруги широтно-імпульсного перетворювача на 10 %. В тяговому режимі струм (крива 6) обмежувався на рівні 600А. Від'ємні значення струму на кривій відповідають режиму рекуперації та заряду конденсатора (крива 7). При досягненні напругою іоністора значення 300 В відбувався процес заряду АБ, величина напруги якої показане кривою 8. З метою дослідження тенденції зміни витрат палива від зміни режиму ведення поїзда існує необхідність у фіксації розходу пального, що відображено кривою 4.

Використовуючи данні таблиці 5 будемо залежності у вигляді тривимірних поверхонь: витрати палива (рис. 17), величина напруги АБ (рис. 18), величина напруги К (рис. 19) від максимальної швидкості тахограми та часу руху перегоном.

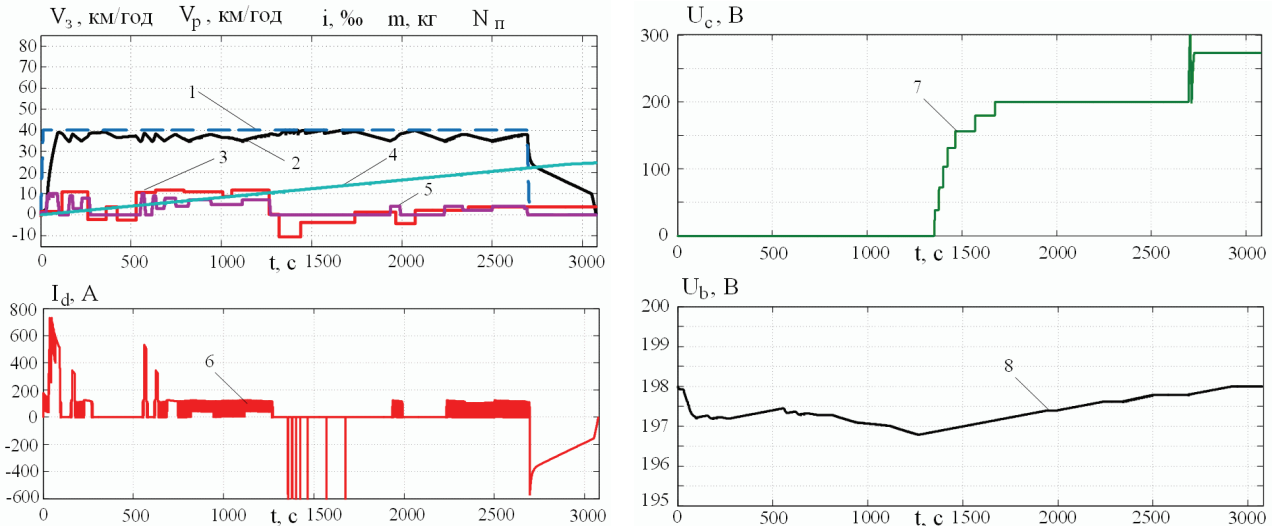


Рисунок 12 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 40 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

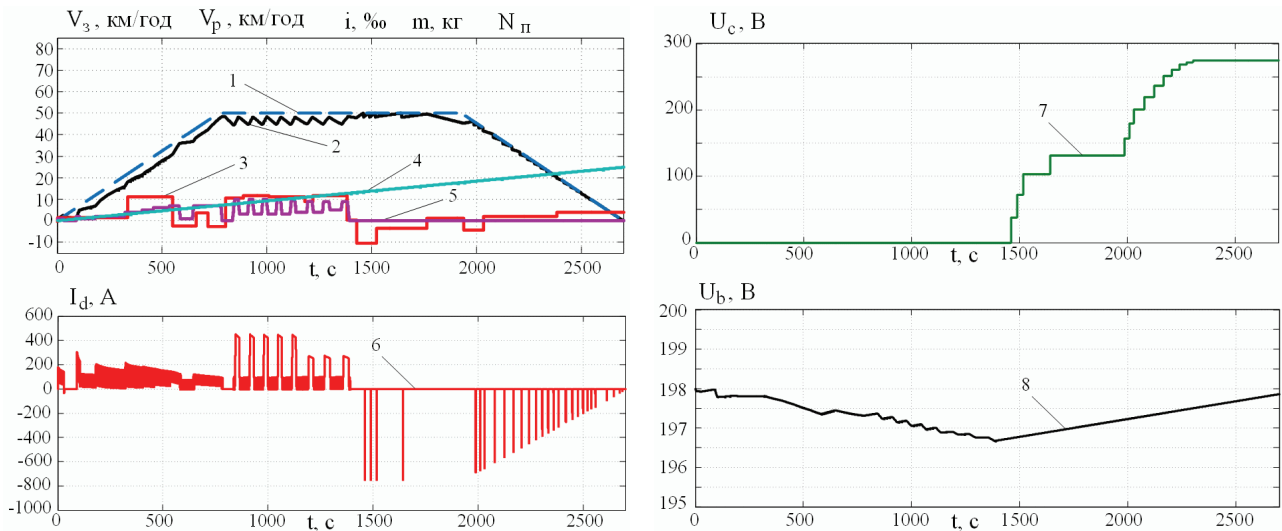


Рисунок 13 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 50 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

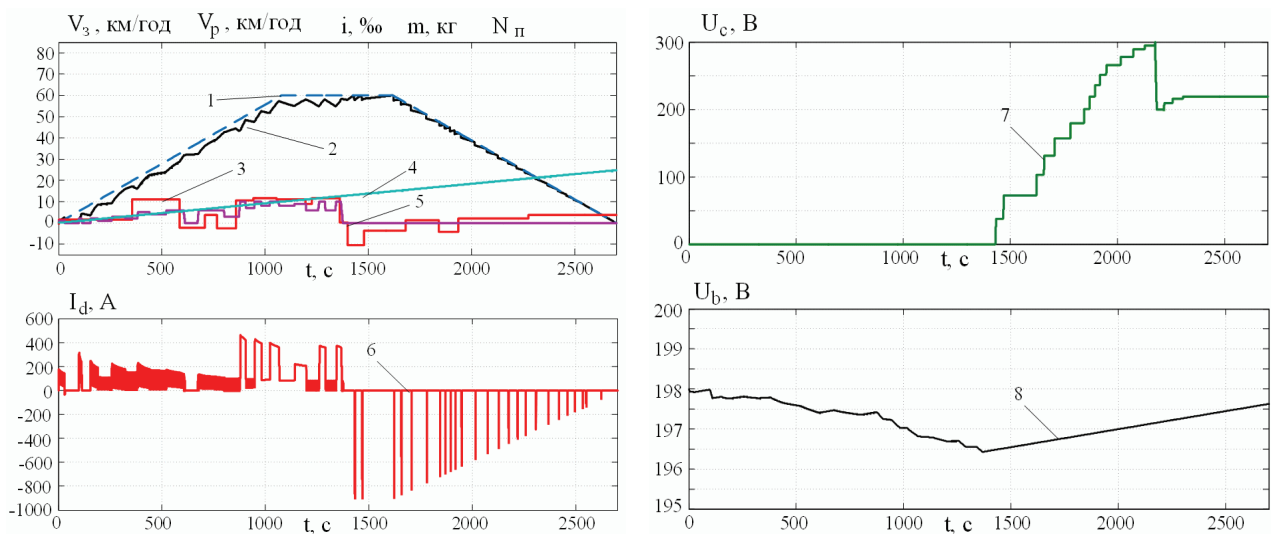


Рисунок 14 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 60 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

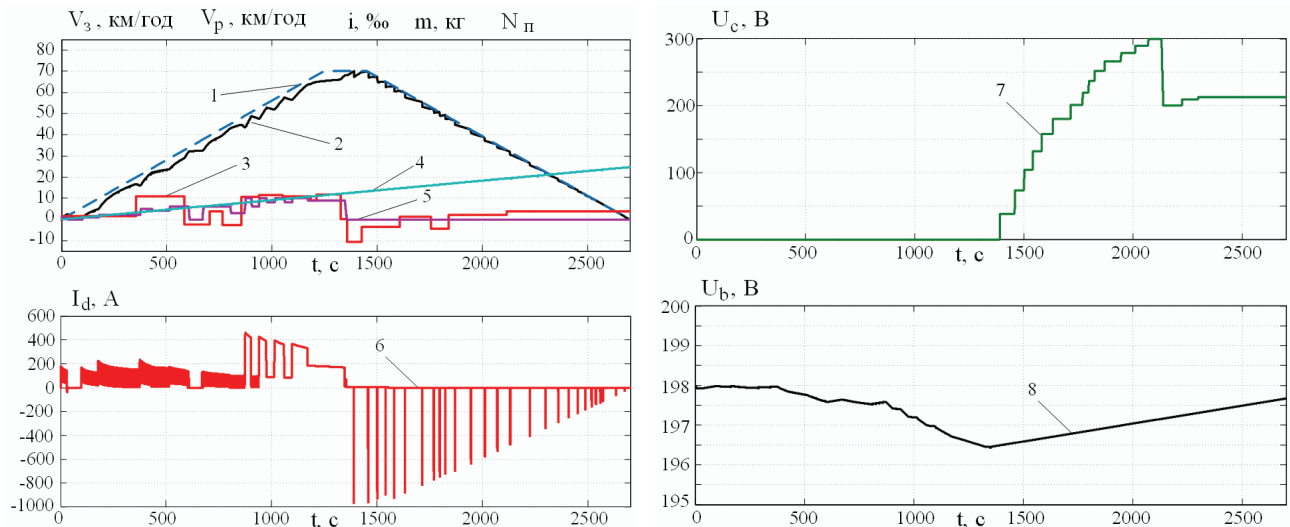


Рисунок 15 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 70 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

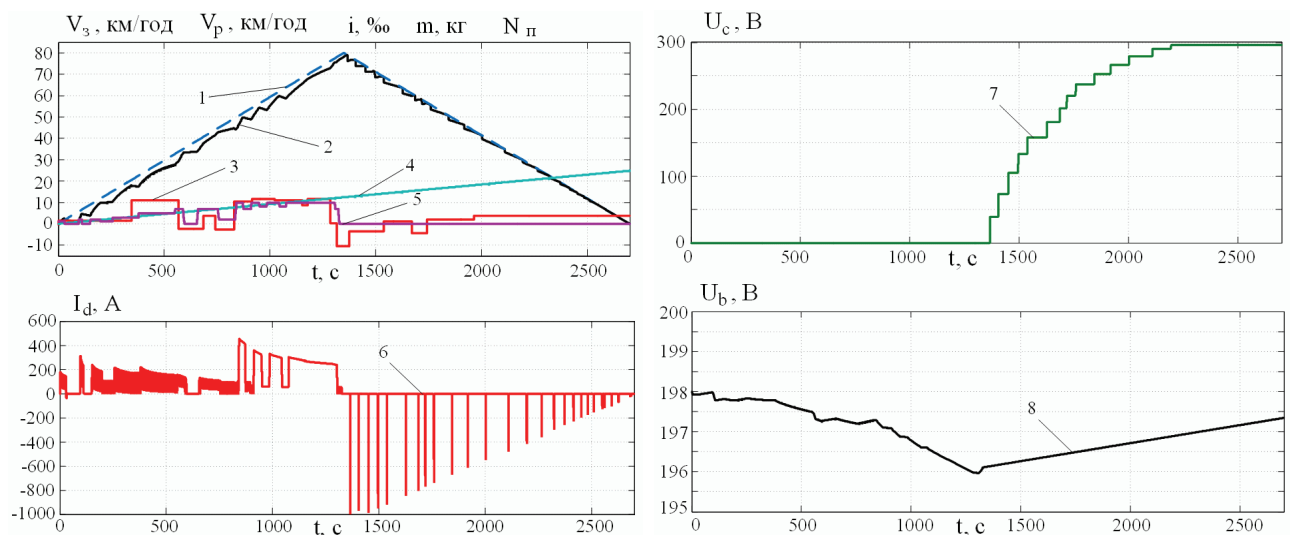


Рисунок 16 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 80 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

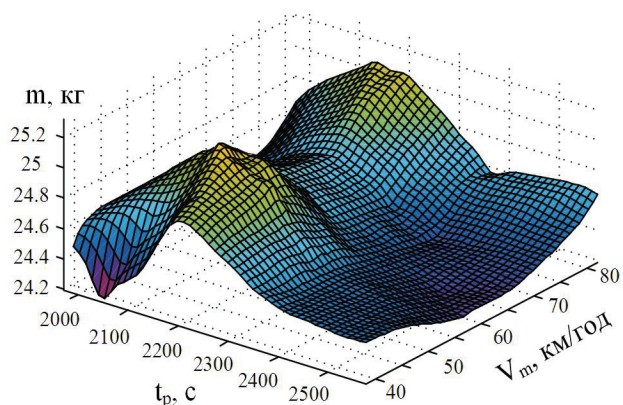


Рисунок 17 – Зміна витрат палива гібридним тепловозом в залежності від максимально швидкості трикутної діаграми

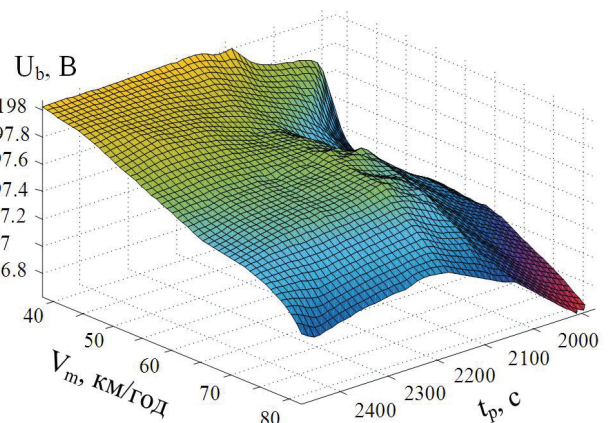


Рисунок 18 – Зміна напруги АБ в залежності від максимально швидкості трикутної діаграми

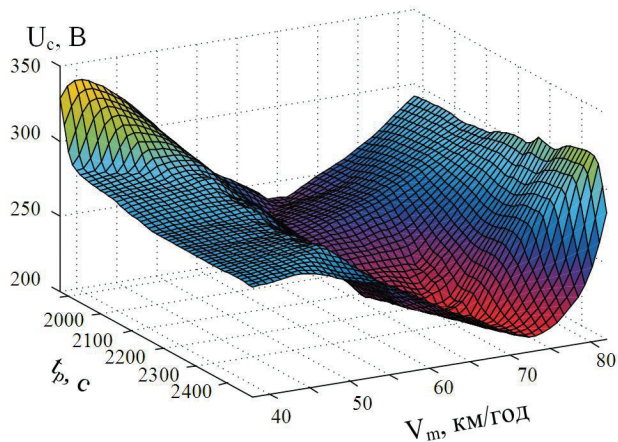


Рисунок 19 – Зміна напруги К в залежності від максимально швидкості трикутної діаграми

Таблиця 5 – Результати моделювання

Максимальна швидкість трикутної тахограми, км/год	Максимальна швидкість руху потяга за тахограмою, км/год	Витрати палива, кг	Величина напруги АБ, В	Величина напруги К, В
70	40	24,48	198	273
	50	24,41	197,9	283
	60	24,24	197,6	234
	70	24,39	197,5	213
75	40	24,43	198	277
	50	24,46	197,9	279
	60	24,37	197,7	228
	70	24,38	197,6	208
80	40	24,58	198	271
	50	24,53	197,8	274
	60	24,47	197,6	221
	70	24,32	197,6	210
85	43	24,98	197,9	278
	50	25,27	197,6	284
	60	24,68	197,8	241
	70	24,73	197,7	253
90	80	25,04	197,4	284
	50	25,09	197,3	292
	60	24,82	197,4	240
	70	24,67	197,2	261
95	80	25,11	196,9	289
	50	24,64	197,1	298
	60	24,59	197,2	235
	70	24,37	197	242
	80	24,61	196,7	287

Висновок. Отримана залежність витрат палива (див. рис. 17) дає змогу стверджувати, що тепловоз із гібридною силовою установкою є більш енергоефективним, ніж традиційний. Спостерігаються два явних максимуми при швидкостях 80 км/год та 50 км/год для трикутної діаграми з максимальною швидкістю 90 км/год. Величини цих екстремумів складають 25,11 та 25,09 кг відповідно. Зменшення витрат палива тепловозом знаходиться у межах 5,62-11,2 кг у порівнянні з традиційною системою, що складає від 18,7% до 31,3 %.

В поверхні (див. рис. 19) спостерігається зона мінімального значення напруги на К (208-261 В) в діапазоні швидкостей 55-75 км/год, що відповідає його переходу в режим заряду АБ. У цьому ж діапазоні швидкостей на поверхні витрати палива спостерігається зона мінімальних значень в результаті зменшення навантаження на дизель.

Аналізуючи залежність величини напруги АБ (див. рис. 18) спостерігається тенденція до збільшення заряду АБ при зменшенні максимальних швидкостей руху по перегону.

Список літератури

1. Байрачний Б.І., Тульський Г.Г., Штефан В.В., Токарева І.А. Технічна електрохімія. Частина V. Сучасні хімічні джерела струму, електроліз розплавів, електросинтез хімічних речовин. Харків: НТУ «ХПБ», 2016. 271 с.
2. Buriakovskiy S.G., Maslii A.S., Pomazan D.P., Panchenko V.V. The research of the operation modes of the diesel locomotive ЧМЕЗ on the imitation model. Electrical engineering & electromechanics № 2018/4, Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics, 2018. P. 24-28.
3. Деніс І.В., Буряковський С.Г., Маслій А.С., Помазан Д.П. Обґрунтування необхідності модернізації тепловозу ЧМЕЗ із використанням гібридної силової установки. Електрифікація транспорту. Дніпро: ДНУЗТ, 2016. № 12. С. 82-85.
4. Любушин Н.П., Брікач Г.С. Використання узагальненої функції бажаності Харрінгтона в багатопараметричних економічних задачах. Економічний аналіз. Теорія і практика. 2014. № 18 (369). С.1-10.
5. Іллічов А.С., Наді А.І., Яковлев В.Г. Узагальнений критерій якості частотних перетворювачів. Известия вузів. Північно-кавказький регіон. Технічні науки. 2006. №2. С. 28-31.
6. Омеляненко В.І., Бондаренко В.О., Омеляненко Г.В., Оверьянова Л.В. Накопичувачі енергії – перспективна технологія для залізниць. Міжнародний інформаційний науково-технічний журнал «Локомотив-інформ». Харків: Техностандарт, 2011. № 4. С. 4-9.
7. Круглов В.В., Дли М.І., Голунь Р.Ю. Нечітка логіка і штучні нейронні мережі. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 221 с.
8. Ієлін С.П. Теорія ймовірності і математична статистика на базі MATLAB. Харків: НТУ «ХПБ», 2006. 612 с.
9. Бурков А.Т. Електронна техніка та перетворювачі. Москва: Транспорт, 1999. 464 с.
10. David M. Finite Element Method Magnetics. User's Manual. 2004. Version 3.4. 79 p.
11. Krishnan R. Switched reluctance motor drives. Modeling. Simulation, Analysis, Design and Applications. CRC Press, 2001. 398 p.
12. Соколовський Г.Г., Башарин А.В., Новиков В.А. Управління електроприводами. Енергоіздат, 1982. 392 с.
13. Rasmussen P.O. Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors. Denmark: Aalborg University, 2002. 256 p.
14. Balaji M., Kamaraj V. Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm. European Journal of Scientific Research, Vol. 47 No.2 (2010). P. 187-196.
15. Denys I., Buriakovskiy S., Babaiev M., Liubarskiy B., Karpenko N., Maslii Ar., Pomazan D., Maslii An. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of a hybrid diesel locomotive. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2018. №1/2 (91). С. 68-75.
16. Miller T.J. Optimal Design of Switched Reluctance Motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2002. № 49. P. 15–27.

17. Manesh Krishnamurty, Chris S Edrington, Ali Emadi, Peyman Asadi, Mehrdad Fahimi, Babak Fahimi Making the Case for Application of Switched Reluctance Motor Technology in Automotive Product. IEEE Transaction on Power Electronics. May 2006. Vol. 21, No. 3. P. 659-675.

18. Ioan-Adrian Viorel, Mircea Crivii, Lars Löwenstein, Loránd Szabó, Mircea Gutman Direct drive systems with transverse flux reluctance motors. Romsnia: Acta Electrotehnica. 2004. № 3.

19. Višinka R. On-fly phase resistance estimation of switched reluctance motor for sensorless based control techniques. Ph.D Thesis. Brno. 2002.

20. Viorel I.A., Strete L., Husain I. An analytical model of switched reluctance motor based on magnetic field analysis results. Proc. of 3rdInt. Symp. on Electrical Engineering and Energy Converters. Romania. 2009. P. 97-100.

21. Martin MANA: Mathematical model switched reluctance motor. Dept. of Power Electrical and Electronic Engineering. 2010. P.25.

References (transliterated)

1. Bairachnyi B.L., Tul'skiy H.H., Shtefan V.V., Tokarieva I.A. Tekhnichna elektrokhemiiia. Chastyna V. Suchasni khimichni dzherela strumu, elektroliz rozplaviv, elektrosintez khimichnykh rehovyn [Technical electrochemistry. Part V. Modern chemical sources of current, electrolysis of melts, electrosynthesis of chemicals substances]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. 271 p.

2. Buriakovskiy S.G., Maslii A.S., Pomazan D.P., Panchenko V.V. The research of the operation modes of the diesel locomotive CHME3 on the imitation model. Electrical engineering & electromechanics № 2018/4, Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics, 2018. P. 24-28.

3. Denis I.V., Buriakovskiy S.H., Maslii A.S., Pomazan D.P. Obgruntuvannia neobkhdnosti modernizatsii teplovozu ChME3 iz vykorystanniam hibrydnoi sylovoi ustanovky [Substantiation of necessity of modernization of CHME3 locomotive using hybrid power plant]. Elektryfikatsiia transportu. Dnipro: DNUZT, 2016. № 12. P. 82-85.

4. Liubushyn N.P., Brikach H.Ie. Vykorystannia uzahalnoyi funktsii bazhannosti Kharrinhona v bahatoparametrychnykh ekonomichnykh zadachakh [Using Harrington's Generalized Function of Gelleability in Multiparameter Economic Problems]. Ekonomichnyi analiz. Teoriia i praktyka. 2014. № 18 (369). P. 1-10.

5. Illichov A.S., Nadi A.I., Yakovliev V.H. Uzahalnenyi kryterii yakosti chastotnykh peretvoriuvachiv [Generalized quality criterion for frequency converters.]. Yzvestyia vuziv. Pivnichnokavkazkyi rehion. Tekhnichni nauky. 2006. № 2. P. 28-31.

6. Omelianenko V.I., Bondarenko V.O., Omelianenko H.V., Overianova L.V. Nakopychuvachi enerhii – perperspektivna tekhnolohiia dlia zaliznyts [Energy storesges – Perspective Technology for Railways]. Mizhnarodnyi informatsiinyi naukovotekhnichniy zhurnal «Lokomotiv-inform». Kharkiv: Tekhnostandart, 2011. № 4. P. 4-9.

7. Kruhlov V.V., Dly M.I., Holun R.Yu. Nechitka lohika i shtuchni neuronni merezhi. [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow: FYZMATLYT, 2001. 221 p.

8. Ihlin S.P. Teoriia ymovirnosti i matematychna statystyka na bazi MATLAB [Probability theory and mathematical statistics based on MATLAB]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2006. 612 p.

9. Burkov A.T. Elektronna tekhnika ta peretvoriuvachi [Electronic equipment and converters]. Moskva: Transport, 1999. 464 p.

10. David M. Finite Element Method Magnetics. Users Manual. 2004. Version 3.4. 79 p.

11. Krishnan R. Switched reluctance motor drives. Modeling. Simulation, Analysis, Design and Applications. CRC Press, 2001. 398 p.

12. Sokolovskiy H.H., Basharyn A.V., Novykov V.A. Upravlinnia elektropyvodamy [Control of electric drives]. Enerhoizdat, 1982. 392 p.

13. Rasmussen P.O. Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors. Denmark: Aalborg University, 2002. 256 p.

14. Balaji M., Kamaraj V. Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm. European Journal of Scientific Research, Vol. 47, No.2 (2010). P.187-196.

15. Denys I., Buriakovskiy S., Babaiev M., Liubarskiy B., Karpenko N., Maslii Ar., Pomazan D., Maslii An. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of a hybrid diesel locomotive. Skhidno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohii. 2018. №1/2 (91). P. 68-75.

16. Miller T.J. Optimal Design of Switched Reluctance Motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2002. № 49. P. 15–27.

17. Manesh Krishnamurty, Chris S Edrington, Ali Emadi, Peyman Asadi, Mehrdad Fahimi, Babak Fahimi Making the Case for Application of Switched Reluctance Motor Technology in Automotive Product. IEEE Transaction on Power Electronics. May 2006. Vol. 21, No. 3. P. 659-675.

18. Ioan-Adrian Viorel, Mircea Crivii, Lars Löwenstein, Loránd Szabó, Mircea Gutman Direct drive systems with transverse flux reluctance motors. Romsnia: Acta Electrotehnica. 2004. № 3.

19. Višinka R. On-fly phase resistance estimation of switched reluctance motor for sensorless based control techniques. Ph.D Thesis. Brno. 2002.

20. Viorel I.A., Strete L., Husain I. An analytical model of switched reluctance motor based on magnetic field analysis results. Proc. of 3rdInt. Symp. on Electrical Engineering and Energy Converters. Romania. 2009. P. 97-100.

21. Martin MANA: Mathematical model switched reluctance motor, Dept. of Power Electrical and Electronic Engineering. 2010. P. 25.

Надійшла (received) 25.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Буряковський Сергій Геннадійович (Буряковский Сергей Геннадиевич, Buryakovskiy Serhii) – доктор технічних наук, професор, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут "Молнія" Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», директор, м. Харків, Україна; <http://orcid.org/0000-0003-2469-7431>; e-mail: ergbug@i.ua

Маслій Артем Сергійович (Маслий Артем Сергеевич, Maslii Artem) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Український державний університет залізничного транспорту», старший науковий співробітник кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна; e-mail: a.masliy@ukr.net

Помазан Данило Повлович (Помазан Данило Павлович, Pomazan Danylo) – аспірант, Національний технічний університет «Український державний університет залізничного транспорту», м. Харків, Україна; e-mail: danyl.pomazan@ukr.net.

Сафронов Олег Едуардович (Сафронов Олег Эдуардович, Safronov Oleh) – студент, Національний технічний університет «Український державний університет залізничного транспорту», м. Харків, Україна; e-mail: sfrnvolh@gmail.com.

Туренко Олександр Геннадійович (Туренко Александр Геннадиевич, Turenko Alexandr) – студент, Національний технічний університет «Український державний університет залізничного транспорту», м. Харків, Україна; e-mail: Aleksandrturenko97@gmail.com.

УДК 621.317.3

*О.М. ВАСИЛЬЄВА, О.В. МАКАРОВ***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В GTEM-КАМЕРІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ**

У роботі представлено опис еталона одиниці напруженості електромагнітного поля в діапазоні частот 10 кГц - 1 ГГц. Еталон складається з GTEM-камери, генератора, підсилювача, засобів вимірювальної техніки, спеціалізованого програмного забезпечення поставлених компанією Роде і Шварц (Німеччина). Наведено результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик вузлів, критичних для величини невизначеності відтворення одиниці напруженості електромагнітного поля. Дана стаття є першою частиною узагальнених результатів досліджень.

Ключові слова: еталон одиниці, напруженість електромагнітного поля, радіочастотний діапазон, метрологічні характеристики, невизначеність.

*Е.М. ВАСИЛЬЄВА, О.В. МАКАРОВ***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В GTEM-КАМЕРЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

В работе представлено описание эталона единицы напряженности электромагнитного поля в диапазоне частот 10 кГц - 1 ГГц. Эталон состоит из GTEM-камеры, генератора, усилителя, средств измерительной техники, специализированного программного обеспечения поставленных компанией Роде и Шварц (Германия). Приведены результаты экспериментальных исследований метрологических характеристик узлов, критических для величины неопределенности воспроизведения единицы напряженности электромагнитного поля.

Данная статья есть первой частью обобщенных результатов исследований.

Ключевые слова: эталон единицы, напряженность электромагнитного поля, радиочастотный диапазон, метрологические характеристики, неопределенность.

*О.М. VASILYEVA, O.V.MAKAROV***EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD DISTRIBUTION IN A GTEM CAMERA FOR CONDUCTING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY TESTS**

The paper describes the reference of the unit of intensity of the electromagnetic field in the frequency range of 10 kHz - 1 GHz. The standard consists of a GTEM camera, generator, amplifier, measuring equipment, specialized software supplied by Rode and Schwartz (Germany). The results of experimental studies of the metrological characteristics of nodes critical for the magnitude of the uncertainty of the reproduction of a unit of electromagnetic field intensity are presented. This article is the first part of the generalized research findings.

Keywords: unit standard, electromagnetic field strength, radio frequency range, metrological characteristics, uncertainty.

Проблеми метрологічного забезпечення радіоелектронних систем і підвищення достовірності вимірювань в області надвисоких частот радіохвиль визначають необхідність подальшого розвитку системи метрологічного забезпечення вимірювань в діапазоні НВЧ. Особливе значення створення еталонної установки відтворення одиниці напруженості електромагнітного поля має для антенних вимірювань, метрологічне забезпечення яких в Україні майже відсутнє і потребує подальшого розвитку.

Структурна схема установки відтворення напруженості електромагнітного поля в GTEM-камері наведена на рис. 1. Невизначеність цього відтворення складається з невизначеностей, пов'язаних з вимірюванням радіочастотної потужності, визначення характеристичного імпедансу GTEM-камери, відстані між центральним провідником і заземленою площиною, орієнтацією і розташуванням зонда. Неузгодженості збільшують невизначеність вимірювання переданої потуж-

ності.

Відтворене електромагнітне поле (ЕМП) обчислюється за формулою

$$E = \frac{\sqrt{P \cdot Z_0}}{h}, \quad (1)$$

де E – напруженість електричного поля;
 P – потужність, що подається до входу GTEM-камери;

Z – хвильовий імпеданс GTEM-камери;

h – висота перерізу робочої зони.

На даному етапі робіт було досліджено метрологічні характеристики спрямованого відгалужувача DCP0100A, який використано в схемі еталона діапазону частот 10 кГц – 1 ГГц.

На рис. 2 наведені характеристики прямих втрат відгалужувача. На рис. 3 наведено характеристики каналу 1–3 відгалужувача. На рис. 4 наведено характеристики каналу 1 – 4 відгалужувача.

© О.М. Васильєва, О.В. Макаров, 2019

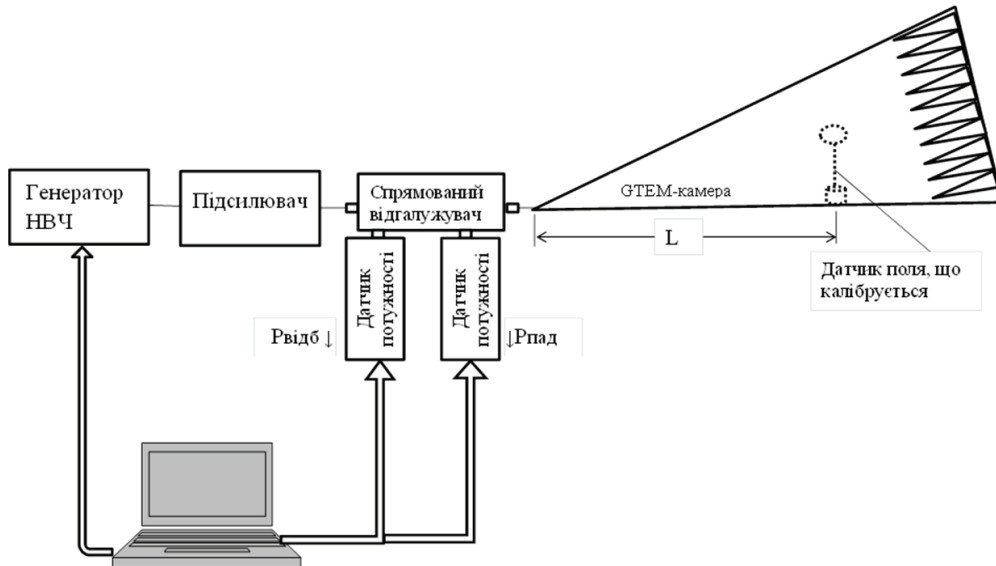
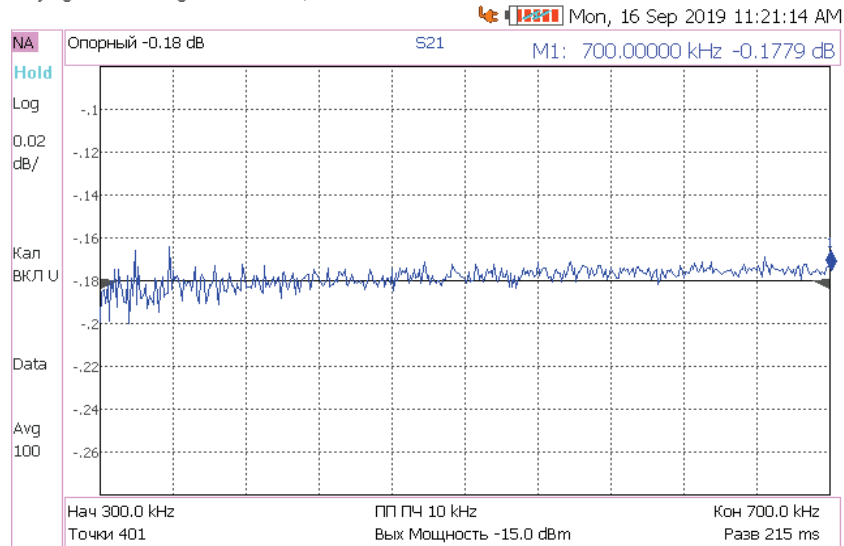


Рисунок 1 – Структурна схема еталонної установки відтворення одиниці напруженості електромагнітного поля у діапазоні частот від 10 кГц до 1 ГГц

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129



Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

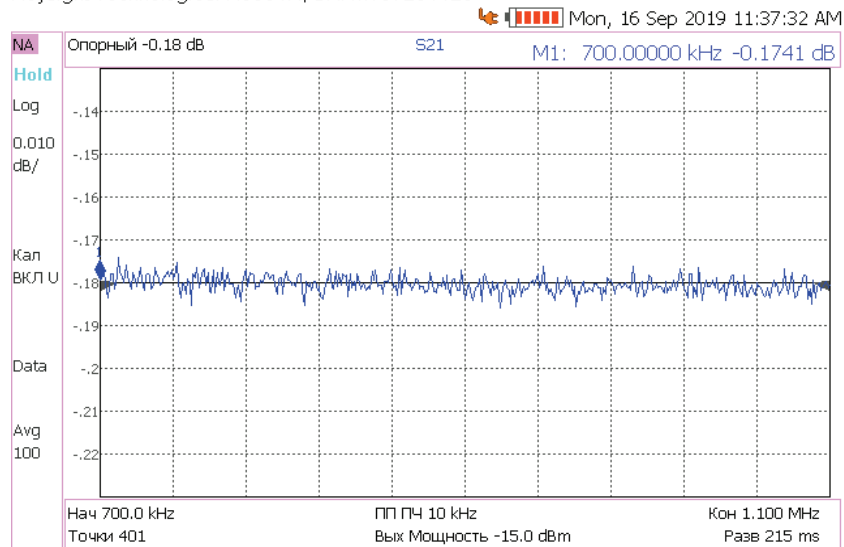
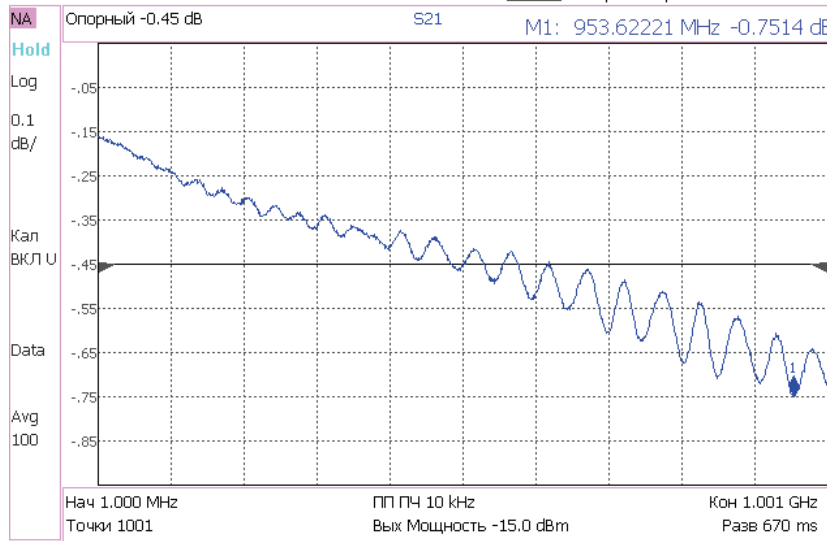


Рисунок 2 – Прямі втрати відгалужувача

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

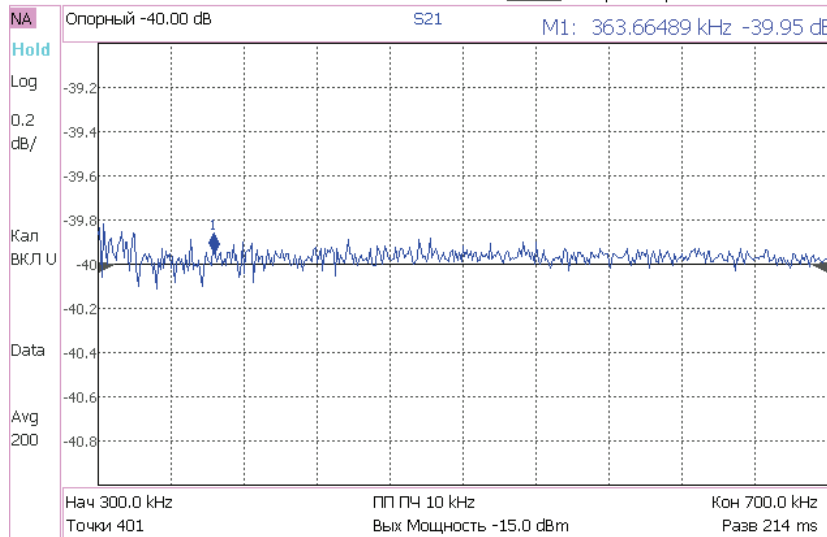
Mon, 16 Sep 2019 10:53:23 AM



Продовження рисунку 2

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

Mon, 16 Sep 2019 11:29:21 AM



Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

Mon, 16 Sep 2019 11:39:53 AM

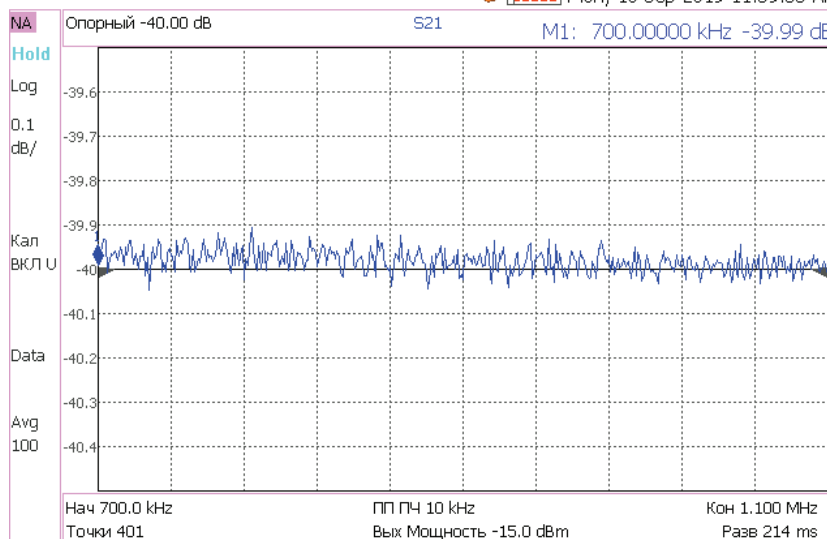
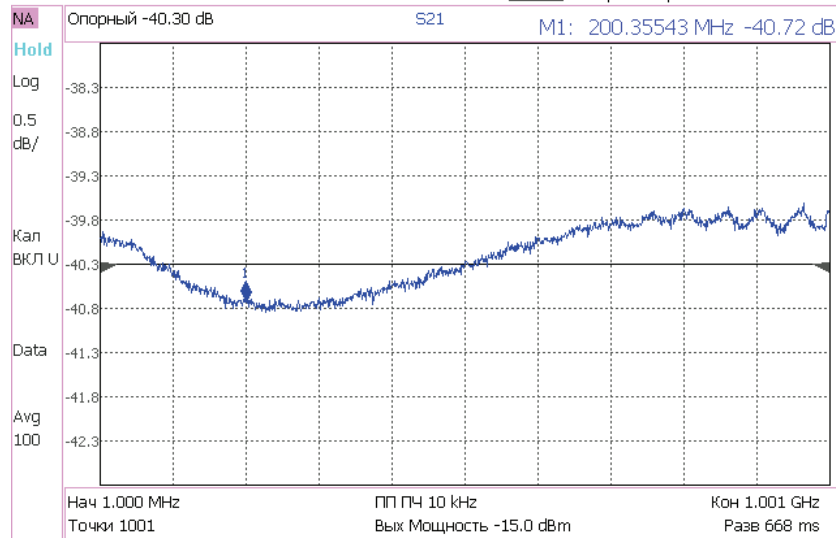


Рисунок 3 – Характеристики канала 1 – 3 відгалужувача

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

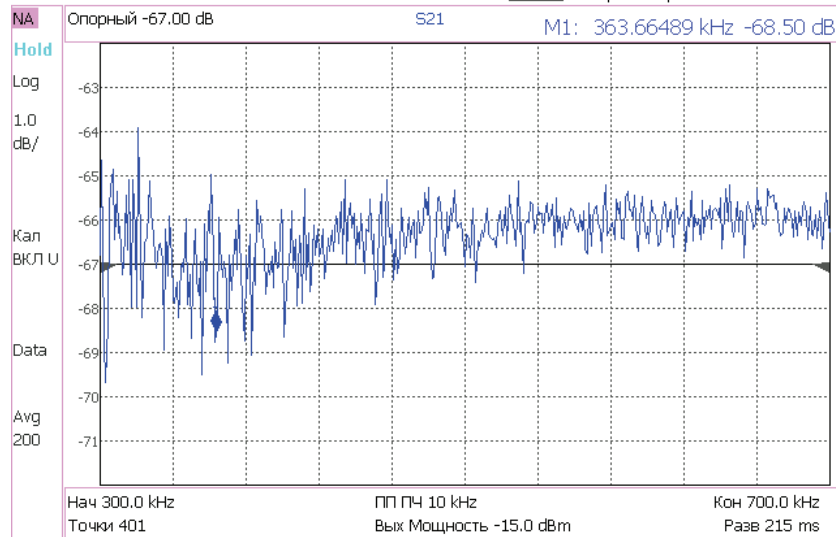
Mon, 16 Sep 2019 11:00:27 AM



Продовження рисунку 3

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

Mon, 16 Sep 2019 11:32:23 AM



Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

Mon, 16 Sep 2019 11:41:43 AM

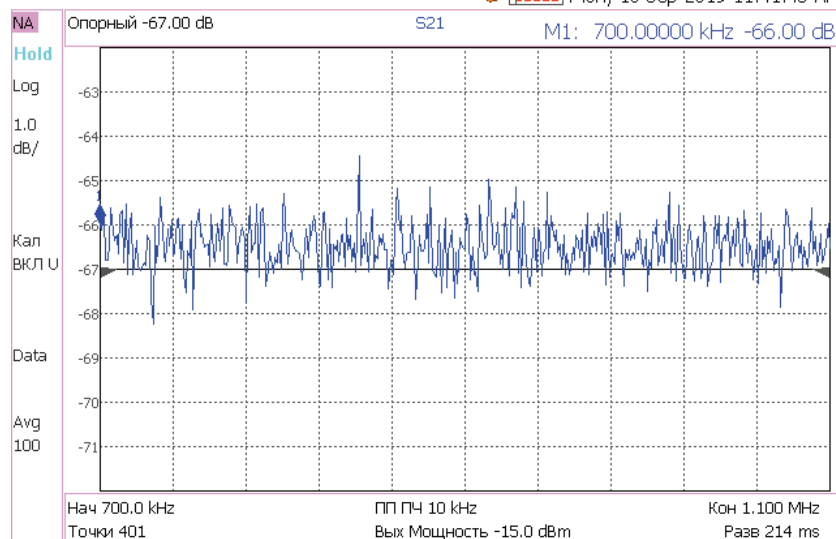
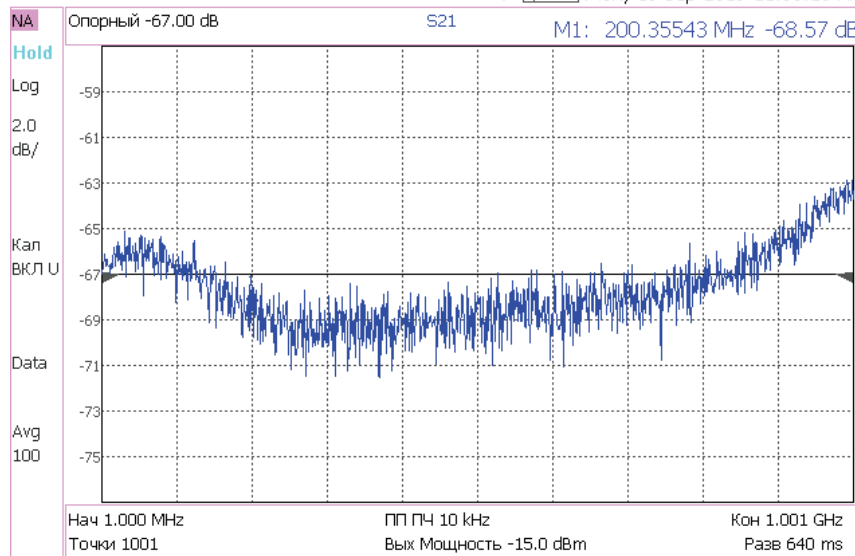


Рисунок 4 – Характеристики канала 1 – 4 відгалужувача

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

Mon, 16 Sep 2019 11:06:10 AM



Продовження рисунку 4

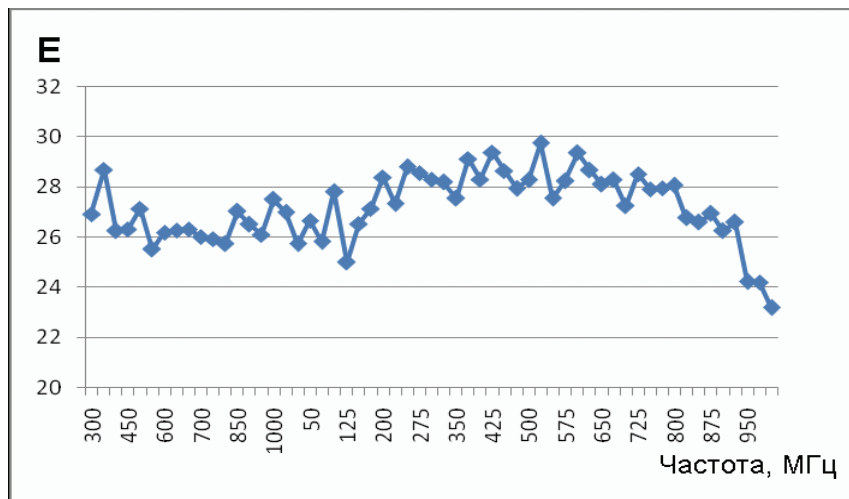


Рисунок 5 – Характеристики спрямованості відгалужувача

Результати досліджень дозволили провести вимірювання в ГТЕМ-камері згідно з рівнянням (1).

Дослідження проводилися за допомогою еталонного вимірювача напруженості електромагнітного поля Narda NMB-550.

Висота площини вимірювання $h = 1,34$ м.

Нахил датчика близько 10 градусів.

Початкова висота датчика по перпендикуляру від підлоги 0,66 м.

Відстань між точками 0,03 м.

Номер точки збільшується зі зменшенням висоти датчика.

Потужність радіочастотного сигналу на вході ГТЕМ-камери, підтримувана в кожній точці 3,592 Вт.

Аналіз результатів дослідження показує, що поле розподілене нерівномірно по частоті та перерізу площини ГТЕМ-камери, тому при визначенні еталонних частотних точок еталонної установки необхідно враховувати результати математичного моделювання, отримані на попередніх етапах. Це в кінцевому підсумку і визначить мінімальне значення невизначеності

еталона. Попередні результати аналізу свідчать про необхідність роботи на висоті 0,6-0,57 м від підлоги (див. рис. 6, 7) з врахуванням частотної залежності розподілу поля у цьому перерізі.

В ході виконання досліджень було розроблено і виготовлено пристрій просторового розташування датчика поля, що досліджується, у камері ГТЕМ. Зовнішній вигляд пристрою наведено на рис. 8.

Пристрій розташування виготовлено з непровідного матеріалу та дозволяє:

- змінювати висоту розташування датчика поля на 54 см з кроком у 3 см;
- переміщувати датчик поля у горизонтальній площині у вздовж камери ГТЕМ на 36 см з кроком у 3 см;
- регулювати кут нахилу датчика поля;
- розміщувати датчики поля з різним засобами кріплення;
- розташовувати датчик поля практично у будь-якій точці робочого простору камери ГТЕМ.

Таблиця 1 – Результати вимірювання електромагнітного поля

№ точки	Висота	Частота, МГц									
		0,1	0,3	1	3	10	100	200	300	500	1000
Датчик EF0391											
1	0,661	13,17	13,76	12,34	10,875	9,85	9,268	6,875	8,545	9,161	10,38
2	0,63	13,09	13,77	12,36	10,875	9,855	9,367	7,293	8,688	9,07	10,39
3	0,605	12,14	12,71	11,44	10,13	9,201	9,015	6,334	8,279	8,372	9,891
4	0,571	11,49	11,93	10,76	9,626	8,723	8,058	7,778	7,854	8,312	9,893
5	0,54	11,275	11,74	10,62	9,512	8,625	7,863	7,878	7,743	8,226	9,816
6	0,511	10,64	11,03	9,98	8,953	8,18	8,343	5,729	7,857	7,718	10,09
7	0,465	10,02	10,27	9,302	8,397	7,693	8,056	5,511	7,663	7,52	9,628
8	0,444	9,724	9,978	9,079	8,244	7,53	7,804	7,531	7,452	8,235	9,568
Датчик EF1891											
		0,1	0,3	1	3	10	100	200	300	500	1000
1		-	-	-	10,04	9,614	9,11	7,051	8,593	9,167	10,39
2		-	-	-	10,175	9,72	9,273	7,425	8,805	9,065	10,45
3		-	-	-	9,251	8,895	8,87	6,458	8,33	8,365	9,828
4	0,548	-	-	-	8,894	8,518	8,155	7,78	7,98	8,505	9,795
5	0,514	-	-	-	8,593	8,316	8,394	6,345	8,045	7,987	9,94
6	0,465	-	-	-	8,132	7,9	8,21	5,92	7,985	7,762	9,992
7	0,447	-	-	-	7,45	7,294	7,884	5,627	7,837	7,526	9,373
8		-	-	-	7,365	7,165	8,015	7,485	7,582	7,833	9,525

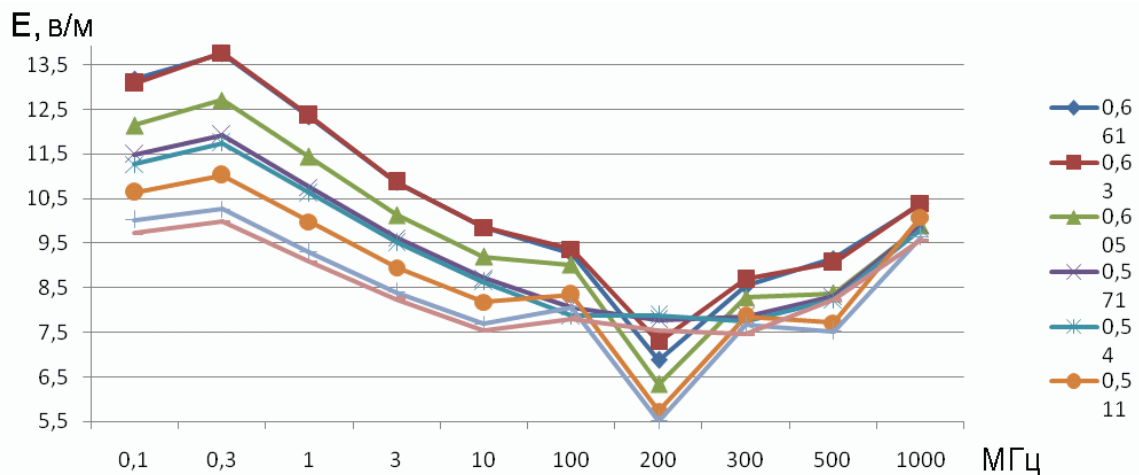


Рисунок 6 – Результати вимірювання електромагнітного поля (Датчик EF0391)

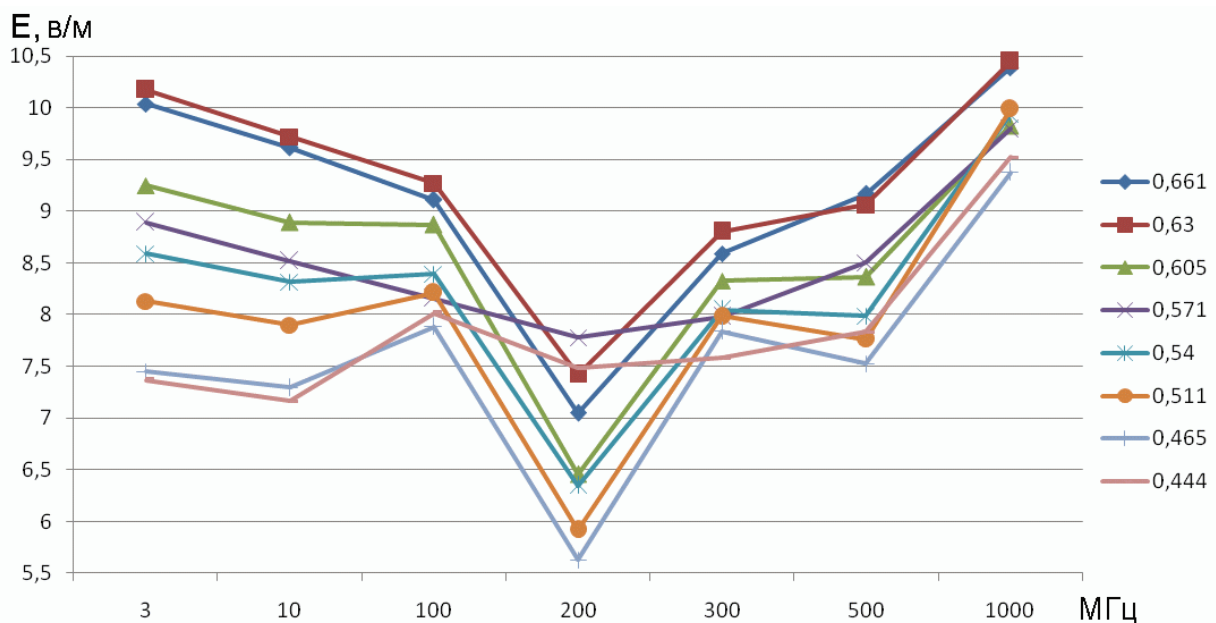


Рисунок 7 – Результати вимірювання електромагнітного поля (Датчик EF1891)



Рисунок 8 – Зовнішній вигляд датчика Е поля

Список літератури / Bibliography

1. Malaric K., Sarolic A., Roje V., Bartolic J., Modlic B. Measured distribution of electric field in GTEM-cell. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Montreal, Canada, August 13-17, 2001. Vol. 1. P. 139-141.
2. ДСТУ ІЕС 61000-4-20:2013. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості та емісію в TEM-камерах.
3. Wilson P. On correlating TEM cell and OATS emission measurements. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1995. Vol. 37 (1). P. 1-16.
4. Harrington T.E., Zhong C., Foegelle M.D. GTEM radiated emissions correlation testing and FDTD modeling. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Seattle, Washington D.C USA, August 2-6, 1999. P. 770-775.
5. Crawford M.L. Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells. Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on. 1974. EMC-16 (4). P. 189-195.
6. Crawford M.L., Workman J.L. and Thomas C.L. Expanding the Bandwidth of TEM Cells for EMC Measurements. Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on. 1978. EMC-20 (3). P. 368-375.
7. ETS-Lindgren. Gigahertz Transverse Electromagnetic cell (GTEM) Model 5400 Series. 2005. Cedar Park, TX.
8. Paul J., Christopoulos C., Thomas D. Technical Report 9SRPE040 WP-N2. University of Nottingham. Nottingham, NG72RD. United Kingdom, May 2001.
9. Icheln C. The construction and application of a GTEM cell. Master Thesis, Faculty of Electrical Engineering, 1995, Technical University of Hamburg-Harburg.
10. Ishigami S., Harima K., Yamanaka Y. Estimation of E-field distribution in a loaded GTEM cell. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Montreal, Canada, August 13-17, 2001. P. 129-134.
11. De Leo R., Rozzi T., Svara C., Zappelli L. Rigorous analysis of the GTEM cell. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1991. Vol. 39(3). P. 488-500.
12. Harrington T.E. GTEM fields FDTD modeling. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Austin, Texas USA, August 18-22, 1997. P. 614-619.
13. Hansen D., Ristau D., Radasky W.A., Smith K.S. Sources of problems in the GTEM field structure and recommended solutions. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Santa Clara, California USA, August 19-23, 1996. P. 48-51.
14. Hansen D., Ristau D., Spaeth T., Radasky W.A., Smith K.S. Expansions on the GTEM field structure problem. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Atlanta, USA, August 14-18, 1995. P. 538-542.
15. De Leo R., Schiavoni A. FDTD evaluation of scattering by metallic objects in GTEM cells. Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings. 1994. Vol. 141 (4). P. 287-292.
16. Radasky W.A., Smith K.S., Hansen D., Ristau D. Calculations and measurements of fast EM pulses in the GTEM cell. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 1996. Santa Clara, California USA, August 19-23, 1996. P. 52-57.
17. Pierantoni L., Rozzi T., De Leo R., Zappelli L. Numerical modelling of diffraction by objects in GTEM cell. Second International Conference on Computation in Electromagnetics. 1994. P. 351-354.
18. Malaric K., Sarolic A., Roje V., Bartolic J., Modlic B. Measured distribution of electric field in GTEM-cell. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Montreal, Canada, August 13-17, 2001. Vol. 1. P. 139-141.

Надійшла (received) 04.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Васильєва Олена Михайлівна (Васильєва Елена Михайловна, Vasilyeva Elena Mikhailovna) – директор центру електромагнітних вимірювань ННЦ «Інститут метрології»,

Макаров Олег Васильович (Макаров Олег Васильевич, Makarov Oleg Vasilievich) – провідний інженер центру електромагнітних вимірювань ННЦ «Інститут метрології»

*О.М. ВАСИЛЬЄВА, О.В. МАКАРОВ***ДОСЛІДЖЕННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВІДТВОРЕННЯ ОДИНИЦІ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В GTEM-КАМЕРІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЮ СУМІСНОСТІ**

У роботі представлено опис еталона одиниці напруженості електромагнітного поля в діапазоні частот 10 кГц - 1 ГГц. Еталон складається з GTEM-камери, генератора, підсилювача, засобів вимірювальної техніки, спеціалізованого програмного забезпечення поставлених компанією Роде і Шварц (Німеччина). Наведено результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик вузлів, критичних для величини невизначеності відтворення одиниці напруженості електромагнітного поля. Розроблено співвідношення для розрахунку невизначеності еталонної установки напруженості електромагнітного поля. Проведено визначення метрологічних характеристик вузлів еталонної установки для відтворення одиниці напруженості електромагнітного поля. Наведені результати експериментальних досліджень з мінімізації невизначеності за рахунок складової хвилевого опору GTEM-камери, що будуть використані при калібруванні еталонної установки. Дана стаття є другою частиною узагальнених результатів досліджень.

Ключові слова: еталон одиниці, напруженість електромагнітного поля, радіочастотний діапазон, метрологічні характеристики, невизначеність.

*Е.М. ВАСИЛЬЄВА, О.В. МАКАРОВ***ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В GTEM-КАМЕРЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

В работе представлено описание эталона единицы напряженности электромагнитного поля в диапазоне частот 10 кГц - 1 ГГц. Эталон состоит из GTEM-камеры, генератора, усилителя, средств измерительной техники, специализированного программного обеспечения поставленных компанией Роде и Шварц (Германия). Приведены результаты экспериментальных исследований метрологических характеристик узлов, критичных для величины неопределенности воспроизведения единицы напряженности электромагнитного поля. Разработано соотношение для расчета неопределенности эталонной установки напряженности электромагнитного поля. Проведено определение метрологических характеристик узлов эталонной установки для воспроизведения единицы напряженности электромагнитного поля. Приведенные результаты экспериментальных исследований по минимизации неопределенности за счет составляющей волнового сопротивления GTEM-камеры, которые будут использованы при калибровке эталонной установки. Данная статья является второй частью обобщенных результатов исследований.

Ключевые слова: эталон единицы, напряженность электромагнитного поля, радиочастотный диапазон, метрологические характеристики, неопределенность.

*О.М. VASILYEVA, O.V.MAKAROV***INVESTIGATION OF THE UNCERTAINTY OF THE REPRODUCTION OF A UNIT OF ELECTROMAGNETIC FIELD STRENGTH IN A GTEM CAMERA FOR CONDUCTING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY TESTS**

The paper describes the reference of the unit of intensity of the electromagnetic field in the frequency range of 10 kHz - 1 GHz. The standard consists of a GTEM camera, generator, amplifier, measuring equipment, specialized software supplied by Rode and Schwartz (Germany). The results of experimental studies of the metrological characteristics of nodes critical for the magnitude of the uncertainty of the reproduction of a unit of electromagnetic field intensity are presented. A relation is developed to calculate the uncertainty of the reference setting of the electromagnetic field strength. The determination of the metrological characteristics of the units of the standard installation for the reproduction of the unit of electromagnetic field intensity. The results of experimental studies on minimizing uncertainty due to the component wave resistance of the GTEM camera, which will be used in the calibration of the reference installation, are presented. This article is the second part of the generalized research findings.

Keywords: unit standard, electromagnetic field strength, radio frequency range, metrological characteristics, uncertainty.

Проблеми метрологічного забезпечення радіоелектронних систем і підвищення достовірності вимірювань в області надвисоких частот радіохвиль визначають необхідність подальшого розвитку системи метрологічного забезпечення вимірювань в діапазоні НВЧ. Особливе значення створення еталонної установки відтворення одиниці напруженості електромагніт-

ного поля має для антенних вимірювань, метрологічне забезпечення яких в Україні майже відсутнє і потребує подальшого розвитку.

Структурна схема установки відтворення напруженості електромагнітного поля в GTEM-камері наведена на рис.1. Невизначеність цього відтворення складається з невизначеностей, пов'язаних з вимірюванням

радіочастотної потужності, визначення характеристичного імпедансу ГТЕМ-камери, відстані між центральним провідником і заземленою площиною, орієнтацією і розташуванням зонда. Неузгодженості збільшують невизначеність вимірювання переданої потужності.

Відтворене електромагнітне поле (ЕМП) обчислюється за формулою

$$E = \frac{\sqrt{P \cdot Z_0}}{h}, \quad (1)$$

де E – напруженість електричного поля;

P – потужність, що подається до входу ГТЕМ-камери;

Z – хвильовий імпеданс ГТЕМ-камери;

h – висота перерізу робочої зони.

Відносну сумарну невизначеність напруженості E можна оцінити за формулою:

$$\frac{u_c(E)}{E} = \sqrt{\left(\frac{u(E)}{2P}\right)^2 + \left(\frac{u(Z)}{2Z}\right)^2 + \left(\frac{u(k_f)}{2k_f}\right)^2 + \left(\frac{u(h)}{h}\right)^2 + \left(\frac{u(on)}{on}\right)^2}, \quad (2)$$

де $u(k_f)$ – невизначеність визначення коефіцієнта корекції k_f на розподіл стоячої хвилі;

$u(on)$ – невизначеність, пов'язана з неточним визначенням положення on та орієнтації об'єкта (зонда) у ГТЕМ-камери;

$u(P)$ – невизначеність визначення потужності P , що подається до входу ГТЕМ-камери;

$u(Z)$ – невизначеність визначення хвильового імпедансу ЗГТЕМ-камери;

$u(h)$ – невизначеність визначення висоти h перерізу робочої зони.

Бюджет невизначеності для калібрування в ГТЕМ-камері, наведений в [1], представлено у табл. 1.

Як випливає з табл. 1, основний внесок у невизначеність вносить вимірювання потужності, а також визначення хвильового опору камери.

Таблиця 1 – Бюджет невизначеності для калібрування в ГТЕМ- камері

Внесок	Похибка	Розподіл ймовірності	Ваговий коефіцієнт	Стандартне відхилення
Вимірювач потужності	6,2 %	Прямокутний	0,5	3,6%
Неузгодженість 1	0,9 %	U-образний	0,5	0,7%
Неузгодженість 2	0,9 %	U-образний	0,5	0,7%
Загасання атенуаторів	3,5 %	Прямокутний	0,5	2,1%
Характеристичний імпеданс		Прямокутний	0,5	1,2%
Корекція розподілу стоячої хвилі	2 %	Прямокутний	0,5	1,2%
Відстань розділу		Прямокутний	1	0,3%
Орієнтація та позиціонування зонду	1 %	Прямокутний	1	0,6%
Сумарний				2,4%

Оцінка невизначеності, що внесена характеристичним опором ГТЕМ – камери

Існує два способи перевірки 50 Ом-го характеристичного імпедансу моделі ГТЕМ. Одним з них є використання аналітичних формул [2–6] для отримання імпедансу з відомих геометрій. Інший [7–16] – це збудження однократним одиночним імпульсом у вхідному порті моделі ГТЕМ і спостереження поширення імпульсів по лінії передачі. Результат аналітичного підходу є наближеним і дає результати, які не обов'язково відображають реальну поведінку моделі ГТЕМ. Другий метод є кращим, оскільки він безпосередньо пов'язаний з модельованою структурою. При моделюванні трапецієподібні імпульси напругою 1 В подають до вхідного порту моделі ГТЕМ. Час зростання імпульсу – 1 нс, тривалість вершини – 10 нс, час спадання 1 нс, шпаруватість імпульсів – 1 мкс. Ці імпульси напруги показані на рис. 1. Отримані імпульси величиною 0,5 В вказують, що опір камери був близьким до опору джерела.

Напруга між перегородкою і підлогою була змодельована в місцях уздовж довжини перегородки, щоб дослідити амплітуду трапецієподібного сигналу, коли він рухається по перегородці до кінцевого резистора. Поширення імпульсів від ближнього кінця до далекого кінця у часовій області показано на рис. 1. Модель ГТЕМ відповідала всім критеріям, оскільки: напруга 0,5 В поширювалася уздовж перегородки від

ближнього кінця до далекого кінця, з чого можна заключити, що імпеданс моделі ГТЕМ узгоджений з джерелом і лінією передачі. По-друге, фіксується лише незначний відбитий імпульс. Інформація про напругу, отриману при моделюванні, показує, що опір лінії передачі в моделі ГТЕМ очікується приблизно на рівні 50 Ом.

Розробник ГТЕМ-камери фірма TESEQ, що використана для створення еталона в діапазоні частот 10 кГц – 1 ГГц, надає наведені нижче характеристики імпедансу камери (рис. 2).

Наведений імпеданс близький до 50 Ом, але використання цих значень в розрахунку невизначеності відтворення напруженості електромагнітного поля без належного експериментального підтвердження неможливе.

Хвильовий опір ГТЕМ камери здебільшого залежить від її геометричних розмірів (співвідношення висоти та ширини перегородки). Внаслідок недотримання співвідношення між висотою та шириною перегородки камери за рахунок технології виготовлення та неточного збирання камери величина хвильового опору має різні значення вздовж камери. Тому для зменшення невизначеності відтворення одиниці напруженості електромагнітного поля в камері ГТЕМ, яка викликана відхилення хвильового опору камери від значення 50 Ом, необхідно провести дослідження розподілу хвильового опору вздовж камери ГТЕМ та визна-

чити ділянки камери, де значення хвильового опору має незначну нерівномірність.

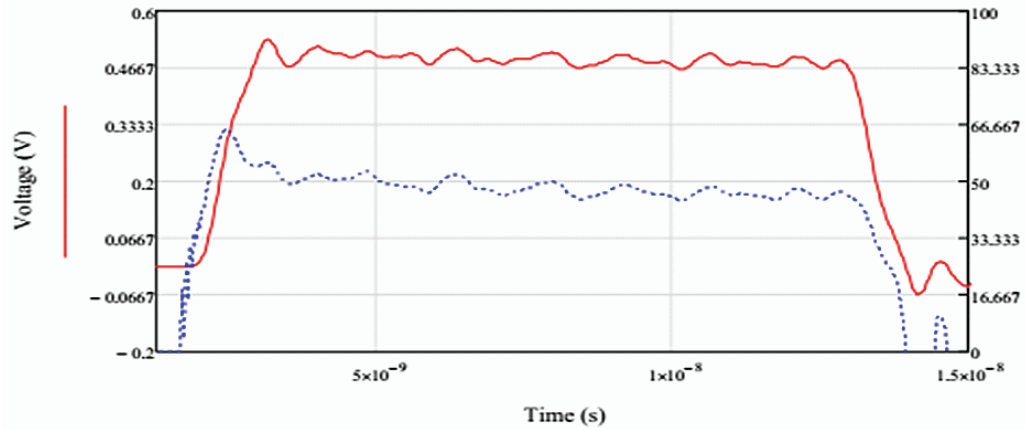
Дослідження проводилися за допомогою аналізатора ланцюгів Keysight N9951A з функцією TDR (TimeDomainReflectometry) – рефлектметрії у часовій області. На рис. 3 подано скріншот розподілу значення хвильового опору вздовж усієї довжини камери GTEM 1500.

Найбільш рівномірний розподіл значення хвильового опору камери спостерігається на відрізьку від трьох до шести метрів від початку камери. Періодичні провали хвильового опору, які спостерігаються на

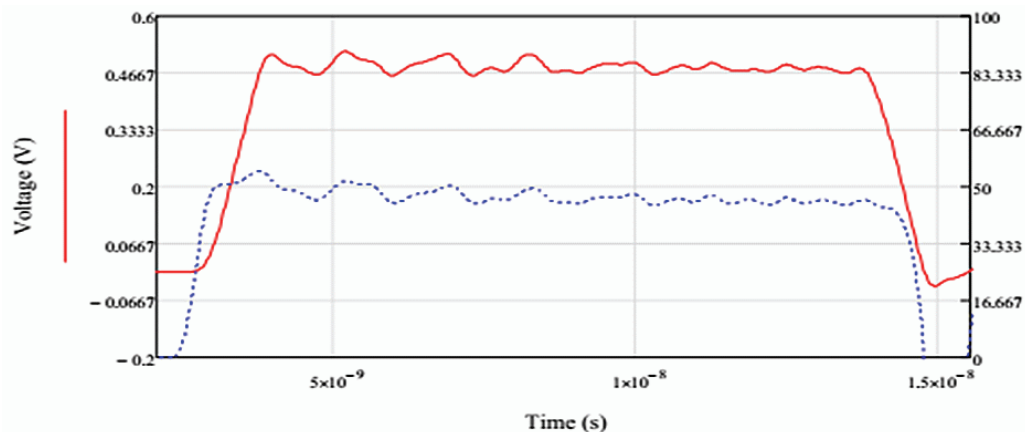
рис. 3, обумовлені технологією виготовлення камери, а саме способом з'єднання листів металу, з яких виготовлена перегородка камери.

На підставі проведення аналізу розподілу значень хвильового опору вздовж камери GTEM1500 було зроблено висновок, що для зменшення невизначеності відтворення одиниці напруженості ЕМП необхідно використовувати ділянки перегородки камери на відстані від початку камери (див. рис. 1-4):

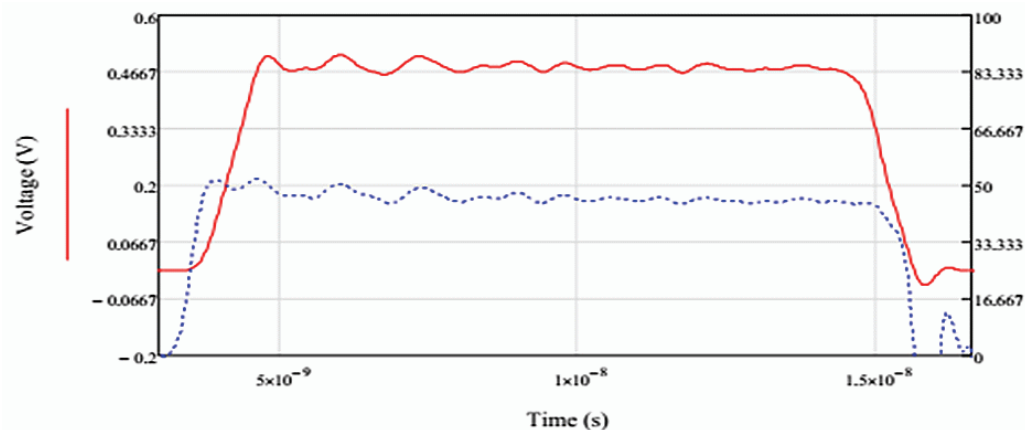
- від 4,14 м до 4,85 м;
- від 5,12 м до 5,85 м.



a



б



в

Рисунок 1 – Поширення трапецієподібних імпульсів напругою 1 В вздовж GTEM-камери

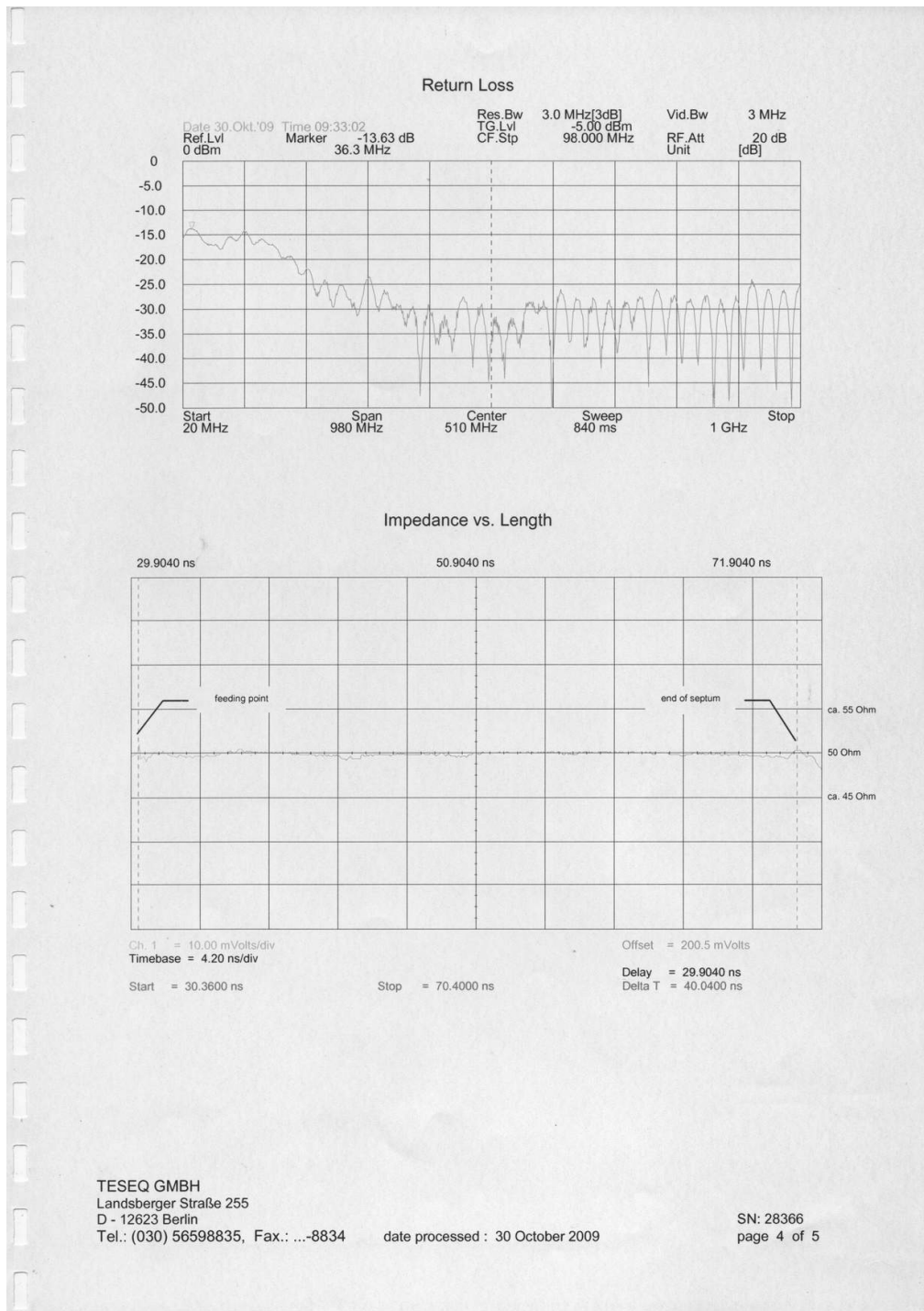


Рисунок 2 – Імпеданс GTEM-камери, наданий виробником

Як видно з рис. 5, нерівномірність значень хвильового опору на визначених ділянках складає менше 0,1 Ом. Це також підтверджує виміряні значення хвильового опору на цих ділянках, що наведені в табл. 2.

В ході досліджень також було вивчено вплив об'єктів калібрування на розподіл значення хвильового опору. Так в камеру GTEM 1500 поміщалися можливі об'єкти калібрування – датчик поля FL7006 та вимірювач напруженості поля NARDA NBM550 з датчиком EF0391. Якщо у випадку розміщення датчика FL7006 розподіл хвильового опору практично не змі-

нювався завдяки малому розміру датчика, то у випадку розміщення вимірювача NARDA NBM550 розподіл хвильового опору змінювався досить суттєво, що представлено на рис. 5.

Ділянка між маркерами 1 і 3 (рис. 5) відповідає збуренню, викликаному розміщенням в камері вимірювача NARDA NBM550. Як видно з рис. 5, розміщення вимірювача в камері викликало зменшення хвильового опору приблизно на 0,3 Ом. З цього можна зробити висновок, що при відтворенні одиниці напруженості ЕМП в камері GTEM, з метою зменшення

невизначеності відтворення, обумовленої відмінністю реального хвильового опору від номінального, необхідно провести вимірювання хвильового опору в площині вимірювань (тобто там де буде розміщено об'єкт калібрування) та врахувати отримане значення при визначенні еталонного рівня напруженості ЕМП.

Для проведення цієї процедури необхідно відкрити опцію TDR (опція 215) у аналізаторі ланцюгів N9951A. Проведені дослідження щодо врахування впливу об'єкта калібрування на розподіл хвильового опору і відповідно напруженості електромагнітного поля, результати яких визначають необхідність постійного контролю значення хвильового опору під час роботи еталонної установки, дають змогу мінімізувати невизначеність відтворення напруженості електромагнітного поля в камері ГТЕМ. За результатами експерименту розширена невизначеність значення хвильового опору може бути обмежена 0,1 Ом.

Таблиця 2 – Значення хвильового опору на відстані від 4,14 м до 5,85 від початку камери

Відстань, м	Хвильовий опір, Ом	Відстань, м	Хвильовий опір, Ом
4,14	50,204	5,12	50,092
4,15	50,203	5,15	50,109
4,20	50,203	5,20	50,114
4,25	50,204	5,25	50,110
4,30	50,190	5,30	50,110
4,35	50,183	5,35	50,106
4,40	50,171	5,40	50,097
4,45	50,158	5,45	50,096
4,50	50,155	5,50	50,090
4,55	50,135	5,55	50,083
4,60	50,122	5,60	50,074
4,65	50,111	5,65	50,067
4,70	50,115	5,70	50,057
4,75	50,120	5,75	50,044
4,80	50,123	5,80	50,034
4,85	50,124	5,85	50,026

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

37% Fri, 21 Jun 2019 4:07:43 PM

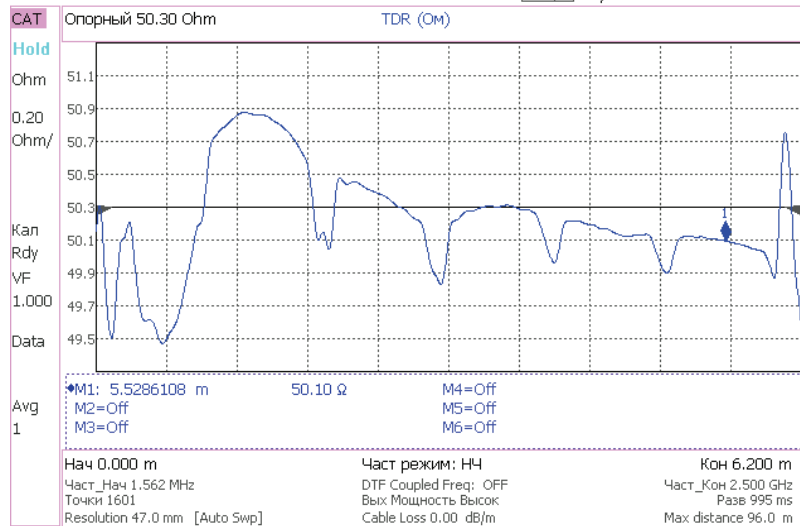


Рисунок 3 – Розподіл значення хвильового опору вздовж камери ГТЕМ1500 TESEQ

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

28% Fri, 21 Jun 2019 4:20:17 PM

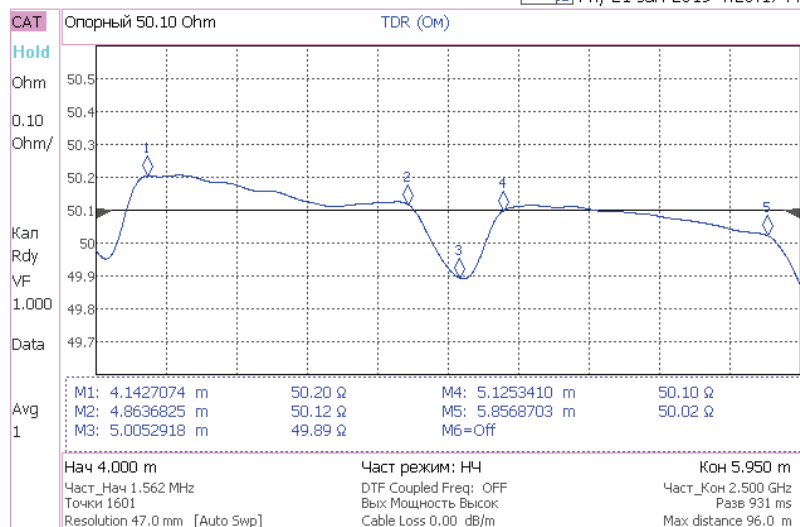


Рисунок 4 – Ділянки перегородки з незначною нерівномірністю хвильового опору

Keysight Technologies: N9951A, SN: MY57201129

25% Fri, 21 Jun 2019 4:25:39 PM

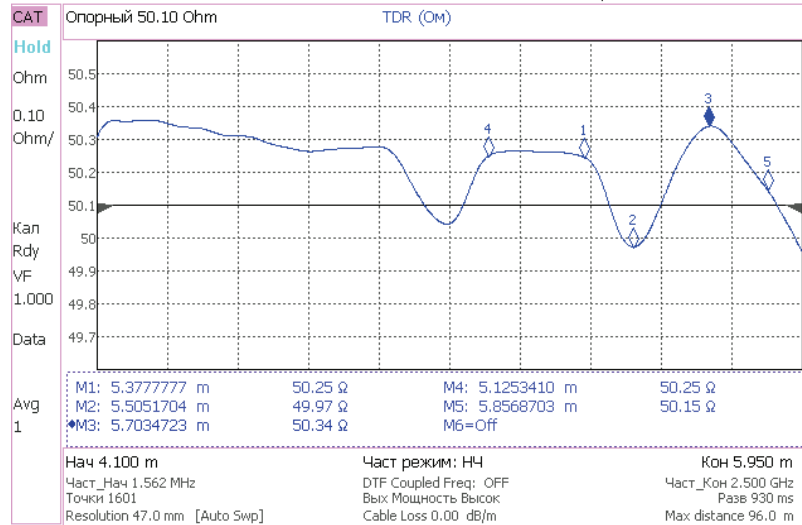


Рисунок 5 – Розподіл хвильового образу

Таблиця 3 – Калькуляція невизначеності калібрування в GTEM-камері

Складові впливу	Максимальна похибка	Розподіл ймовірності	Коефіцієнт впливу	Стандартна невизначеність
Вимірювач потужності	2,0 %	Прямокутний	0,5	0,58 %
Неузгодженість елементів тракту	0,9 %	U-образний	0,5	0,32 %
Загасання атенуаторів	1,5 %	Прямокутний	0,5	0,43 %
Характеристичний імпеданс	0,5 %	Прямокутний	0,5	0,14 %
Корекція на розподіл стоячої хвилі	1,0 %	Прямокутний	0,5	0,29 %
Відстань	0,1 %	Прямокутний	1	0,0577 %
Орієнтація та положення об'єкту, що вимірюється, (зонду)	1,0 %	Прямокутний	1	0,58 %
Сумарна невизначеність				1,03 %
Розширена невизначеність ($k = 2, P = 0,95$)				2,1 %

Оцінювання невизначеності відтворення напруженості еталонної установки, що розробляється, в діапазоні частот 10 кГц – 1 ГГц

На основі приведеного розрахунку було проведено оцінювання невизначеності відтворення напруженості еталона, що розробляється, з урахування особливостей передбачуваної методики проведення вимірювань.

При цьому були зроблені такі припущення щодо розподілу невизначеностей окремих складових:

– оскільки на даному етапі розробки можливо дати оцінки лише максимальних похибок вимірювань окремих складових, обрано прямокутний закон розподілу;

– вплив неузгодженості окремих елементів вимірювального тракту добре апроксимується U-образним розподілом.

Сумарна стандартна невизначеність оцінюється за формулою:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i), \quad (3)$$

де $u(x_i)$ – складові сумарної стандартної невизначеності;

$\partial y / \partial x_i$ – часткові похідні коефіцієнти чутливості або коефіцієнти впливу.

При цьому вважається, що кореляція між оцінками складових x_i відсутня.

Розширена невизначеність оцінюється за формулою

$$U = k u_c(y) \quad (4)$$

де k – коефіцієнт охопту, який залежить від виду розподілу ймовірностей та довірчої ймовірності P .

Висновки. В даному випадку було прийнято нормальний розподіл ймовірностей та $P = 95 \%$, тобто $k = 2$.

Сумарна відносна стандартна невизначеність оцінюється в 1,3%, а розширена – 2,1%. Отримані результати цілком відповідають вимогам технічних характеристик, що необхідні для еталонної установки.

Список літератури / References

1. *Johns P.B., Beurle R.L.* Numerical solution of two-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix. Proc. IEE. 1971. 118(12). P. 1203-1208.
2. *Christopoulos C.* The Transmission-Line Modeling Method: TLM. New Jersey IEEE Press, 1995.
3. *Paul J., Christopoulos C., Thomas D.W.P.* A 3-D Time Domain TLM Electromagnetic Field Solver: regSolve. Nottingham: University of Nottingham. 2000.
4. *Harrington T.E., Zhong C., Foegelle M.D.* GTEM radiated emissions correlation testing and FDTD modeling. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Seattle, Washington D.C USA. August 2-6, 1999. P. 770-775.
5. *Crawford M.L.* Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells. Electromagnetic Compatibility. IEEE Transactions on. 1974. EMC-16(4). P. 189-195.
6. *Crawford M.L., Workman J.L., Thomas C.L.* Expanding the Bandwidth of TEM Cells for EMC Measurements. Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on. 1978. EMC-20(3). P. 368-375.
7. ETS-Lindgren. Gigahertz Transverse Electromagnetic cell (GTEM) Model 5400 Series. Cedar Park, TX. 2005.
8. *Paul J., Christopoulos C., Thomas D.* Technical Report 9SRPE040 WP-N2. University of Nottingham, Nottingham, NG72RD, United Kingdom, May 2001.
9. *Icheln C.* The construction and application of a GTEM cell. Master Thesis, Faculty of Electrical Engineering, 1995, Technical University of Hamburg-Harburg.
10. *Ishigami S., Harima K., Yamanaka Y.* Estimation of E-field distribution in a loaded GTEM cell. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Montreal, Canada, August 13-17, 2001. P. 129-134.
11. *De Leo R., Rozzi T., Svara C., Zappelli L.* Rigorous analysis of the GTEM cell. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1991. 39(3). P. 488-500.
12. *Harrington T.E.* GTEM fields FDTD modeling. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Austin, Texas USA, August 18-22. 1997. P. 614-619.
13. *Hansen D., Ristau D., Radasky W.A., Smith K.S.* Sources of problems in the GTEM field structure and recommended solutions. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Santa Clara, California USA, August 19-23, 1996. P. 48-51.
14. *Hansen D., Ristau D., Spaeth T., Radasky W.A., Smith K.S.* Expansions on the GTEM field structure problem. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Atlanta, USA, August 14-18, 1995. P. 538-542.
15. *De Leo R., Schiavoni A.* FDTD evaluation of scattering by metallic objects in GTEM cells. Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings. 1994. 141 (4). P. 287-292.
16. *Radasky W.A., Smith K.S., Hansen D., Ristau D.* Calculations and measurements of fast EM pulses in the GTEM cell. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1996. Santa Clara, California USA, August 19-23, 1996. P. 52-57.
17. *Pierantoni L., Rozzi T., De Leo R., Zappelli L.* Numerical modelling of diffraction by objects in GTEM cell. Second International Conference on Computation in Electromagnetics. 1994. P. 351-354.
18. *Malaric K., Sarolic A., Roje V., Bartolic J., Modlic B.* Measured distribution of electric field in GTEM-cell. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Montreal, Canada, August 13-17, 2001. Vol. 1. P. 139-141.
19. 61000-4-20. Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques. Section 20: Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2003.
20. *Wilson P.* On correlating TEM cell and OATS emission measurements. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1995. 37 (1). P. 1-16.

Надійшла (received) 11.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Васильєва Олена Михайлівна (Васильєва Елена Михайловна, Vasilyeva Elena Mikhailovna) – директор центру електромагнітних вимірювань ННЦ «Інститут метрології», e-mail: koropetc@ukr.net

Макаров Олег Васильович (Макаров Олег Васильевич, Makarov Oleg Vasilievich) – провідний інженер центру електромагнітних вимірювань ННЦ «Інститут метрології», e-mail: koropetc@ukr.net

УДК 621.318

В.В. КНЯЗЕВ, В.И. КРАВЧЕНКО, И.В. ЯКОВЕНКО**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ
ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНЕГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

В работе предложена физическая модель возникновения обратимых отказов полупроводниковых диодов (влияния наведенных электромагнитным излучением (ЭМИ) токов на вольт-амперные характеристики приборов). Данная модель базируется на механизме преобразования энергии, наведенной внешним ЭМИ токов в энергию собственных электромагнитных колебаний твердотельных комплектующих радиоизделий (эффекте переходного излучения). Обоснована постановка экспериментальных исследований на базе предложенной физической модели обратимых отказов (появления областей вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов с отрицательным сопротивлением). Определены области параметров внешнего электромагнитного излучения и полупроводниковых приборов, при которых реализуется данная физическая модель. Проведены экспериментальные исследования влияния импульсного электромагнитного излучения на вольт – амперные характеристики участков прямого тока диодов. Они показали наличие участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением, характеризующие режим генерации собственных колебаний (увеличение прямого тока при падении напряжения). Результаты сравнительного анализа, полученных в настоящей работе экспериментальных и расчетных данных, позволяют использовать предложенную физическую модель обратимых отказов, а полученные на ее основе расчетные соотношения могут служить основой для определения критериев возникновения и количественных характеристик обратимых отказов полупроводниковых диодов в условиях воздействия на них импульсного электромагнитного излучения.

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

В.В. КНЯЗЕВ, В.И. КРАВЧЕНКО, И.В. ЯКОВЕНКО**ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИБОРІВ ТЕХНІЧНИХ
ЗАСОБІВ В УМОВАХ ДІЇ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

В роботі запропонована фізична модель виникнення оборотних відмов напівпровідникових діодів (впливу наведених електромагнітним випромінюванням (ЕМВ) струмів на вольт-амперні характеристики приладів). Дана модель базується на механізмі перетворення енергії, наведеної зовнішнім ЕМІ струмів в енергію власних електромагнітних коливань твердотільних комплектуючих радіовиробів (ефекті перехідного випромінювання). Обґрунтовано постановку експериментальних досліджень на базі запропонованої фізичної моделі оборотних відмов (появи областей вольт - амперних характеристик напівпровідникових діодів з негативним опором). Визначено області параметрів зовнішнього електромагнітного випромінювання і напівпровідникових приладів, при яких реалізується дана фізична модель. Проведено експериментальні дослідження впливу імпульсного електромагнітного випромінювання на вольт - амперні характеристики ділянок прямого струму діодів. Вони показали наявність ділянок з негативним диференціальним опором, що характеризують режим генерації власних коливань (збільшення прямого струму при падінні напруги). Результати порівняльного аналізу, отриманих в даній роботі експериментальних і розрахункових даних, дозволяють використовувати запропоновану фізичну модель оборотних відмов, а отримані на її основі розрахункові співвідношення можуть служити основою для визначення критеріїв виникнення і кількісних характеристик оборотних відмов напівпровідникових діодів в умовах впливу на них імпульсного електромагнітного випромінювання.

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

V.V. KNYAZEV, V.I. KRAVCHENKO, I.V. YAKOVENKO**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF SEMICONDUCTOR DEVICES OF TECHNICAL
MEANS IN CONDITIONS OF ACTION OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC RADIATION**

In the work is proposed a physical model of advent of reversible failures of semiconductor diodes (of influence of currents induced by electromagnetic radiation (EMR) on volt-ampere characteristics of devices). This model is based on the mechanism of transformation of energy induced by external EMR currents into energy of natural electromagnetic oscillations of solid-state component radio articles (effect of transient radiation). Statement of experimental investigations on the basis of the proposed physical model of reversible processes (advent of areas of volt-ampere characteristics of semiconductor diodes with negative resistance) was substantiated. Areas of parameters of external electromagnetic radiation and semiconductor devices, for those this physical model is realized, are determined. Experimental investigations of influence of pulsed electromagnetic radiation on volt-ampere characteristics of sections of forward current of diodes were conducted. They showed presence of sections with negative differential resistance characterizing the mode of generation of natural oscillations (increase of forward current with decrease of voltage). The results of comparative analysis of experimental and calculated data obtained in this work allow using this the proposed physical model of reversible failures, and

© В.В. Князев, В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, 2019

calculation relations obtained on its basis can serve as a basis for determination of criteria of advent and quantitative characteristics of reversible failures of semiconductor diodes in conditions when they are under action of pulsed electromagnetic radiation.

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

Введение. В настоящее время большинство проблем, связанных с определением степени влияния на рабочие характеристики электрорадиоизделий (ЭРИ) наведенных токов, вызванных процессами взаимодействия внешних электромагнитных излучений (ЭМИ) с собственными электромагнитными колебаниями, возникающими непосредственно в комплектующих ЭРИ, остаются открытыми [1-5].

Между тем, именно взаимодействия такого рода определяют степень отклонения выходных характеристик от нормы, определяемой техническими требованиями на ЭРИ и возможности восстановления их нормального функционирования, т.е. критерии обратимых отказов (временной утраты их работоспособности).

В работе приведена физическая модель возникновения обратимых отказов полупроводниковых диодов (влияния наведенных электромагнитным излучением токов на вольт-амперные характеристики этих приборов). Модель базируется на механизме преобразования энергии наведенных внешним ЭМИ токов в энергию собственных электромагнитных колебаний твердотельных комплектующих радиоизделий (эффекте переходного излучения). Проведен комплекс экспериментальных исследований влияния импульсного электромагнитного излучения на вольт – амперные характеристики начальных участков прямого тока полупроводниковых р-п переходов. Результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных позволяют использовать разработанную физическую модель обратимых отказов и применимость полученных расчетных соотношений для определения критериев возникновения и определения количественных характеристик уровня обратимых отказов.

Цель работы

1. Теоретические исследования влияния внешних ЭМИ на вольт-амперные характеристики полупроводниковых структур.

2. Экспериментальная оценка степени искажения вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов в условиях воздействия стороннего ЭМИ путем определение наличия участков прямого тока с отрицательным сопротивлением в зависимости от эксплуатационных характеристик диодов и параметров внешнего ЭМИ.

3. Проведение сравнительного анализа расчетных данных, полученных на основе предложенной физической модели и данных, полученных в ходе эксперимента.

Теоретические исследования. В работах [6,7] предложена модель преобразования энергии наведенных внешним ЭМИ токов в энергию собственных электромагнитных колебаний твердотельных комплектующих ЭРИ, что и приводит к появлению обратимых отказов последних (временными изменениями

их рабочих характеристик).

Возможность данного преобразования энергии определяется эффектом переходного излучения. Этот эффект реализуется, когда наведенный ток (направление вектора напряженности электрического поля, действующего ЭМИ) перпендикулярен границам полупроводникового прибора (в частности диода) и состоит в следующем [6].

При движении заряда в материальной среде, создаваемое им электромагнитное поле определяется не только величиной заряда и его скорости, но и диэлектрическими свойствами среды распространения. Если эти свойства меняются, когда заряд с постоянной скоростью пересекает границу раздела сред (полупроводниковой структуры), то создаваемое зарядом поле меняется, часть поля отрывается от частицы и может излучаться в пространство. Возникающее при этом излучение получило название как переходное. В результате, при прохождении потока частиц, наведенных ЭМИ, через полупроводниковую структуру происходит непрерывный процесс преобразования энергии зарядов в энергию собственных колебаний поля, т.е. в структуре устанавливается режим генерации колебаний.

Таким образом, электронная система теряет часть своей энергии, т.е. рост тока сопровождается падением напряжения, что и приводит к появлению участков ВАХ с отрицательным сопротивлением. Режим (генерации) (неустойчивости колебаний) характеризуется экспоненциальным ростом амплитуды собственных колебаний структуры вида ($\approx \exp(+\gamma t)$), где γ – инкремент неустойчивости.

Результаты исследований пучковых неустойчивостей (определение величины инкремента неустойчивости γ), полученные в работе [8], позволяют оценить величину энергии излучения собственных колебаний и получить расчетные соотношения между параметрами воздействующего импульсного поля, параметрами полупроводникового прибора и степенью отклонения их вольт-амперных характеристик (ВАХ) на участке прямого тока.

Мощность излучения $\Delta P_{\text{изл}}$ собственных колебаний полупроводникового прибора в условиях воздействия внешнего поля (наличия наведенного тока) можно определить как потери энергии поступательного движения потока частиц (кинетической энергии) за время прохождения потоком частиц области локализации поля поверхностной волны.

$$\Delta P_{\text{изл}} = \frac{\Delta W_{\text{кин}}}{\Delta t}, \quad (1)$$

где $\Delta W_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2} (n_{\text{об}} V)$;

$\frac{mv^2}{2}$ – кинетическая энергия частицы пучка, на-

веденного внешним импульсом;

n_{ob} , v , e , m – соответственно концентрация, дрейфовая скорость, заряд и масса электронов пучка;

V – объем, занимаемый наведенным током (объем твердотельной структуры). В режиме пучковой неустойчивости дрейфовая скорость $v \approx v_0 \exp(+\gamma t)$, поэтому:

$$\Delta P_{изл} \approx m v_0^2 \gamma (n_{ob} V), \quad (2)$$

где $\gamma \approx \left(\frac{\omega_b^2}{\omega_1^2} \right) \frac{1}{\tau}$ – инкремент пучковой неустойчивости

поверхностных колебаний структуры с собственной частотой ω_1 , комплекующей полупроводниковый прибор (поверхностных поляритонов) [6];

$$\omega_b = \left(\frac{4\pi e^2 n_{ob}}{m} \right)^{1/2} - \text{плазменная частота электронов}$$

потока, наведенного внешним ЭМИ;

τ – время пролета заряда области локализации колебаний.

Таким образом, энергия излучения $\Delta W_{изл}$ за время воздействия импульса напряжения $\Delta t_{имп}$ внешнего ЭМИ определяется выражением

$$\Delta W_{изл} = \Delta P_{изл} \Delta t_{имп} = m v_0^2 \gamma \left(\frac{\omega_b^2}{\omega_1^2} \right) \frac{1}{\tau} (n_{ob} V) \Delta t_{имп}. \quad (3)$$

Параметры определяющие величину $\Delta W_{изл}$ можно оценить используя существующие экспериментальные зависимости величины наведенных токов исследуемых структур [7-10] (т.е. величины концентрации n_b , дрейфовой скорости v_0 , ленгмюровской частоты электронов наведенного тока ω_b) от параметров внешнего импульсного электрического поля (амплитуды E_0 и длительности $\Delta t_{имп}$). Собственные частоты ω_1 определяются параметрами структуры, комплекующей исследуемый полупроводниковый прибор (концентрацией носителей тока, диэлектрической проницаемостью и размерами). Для высокочастотных и импульсных полупроводниковых диодов, исследуемых в настоящей работе, частоты ω_1 лежат в субмиллиметровом диапазоне [11].

Воспользовавшись соотношением (3), можно оценить потери энергии наведенных внешним ЭМИ токов на возбуждение собственных колебаний структур металл – полупроводник – диэлектрик, свойственных полупроводниковым диодам.

Очевидно, что режим генерации в полупроводниковых приборах приводит к появлению S-образных участков прямого тока с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике (ВАХ) прибора [11] (рис. 1), поскольку отрицательное сопротивление характеризует потери энергии электронной системы твердотельной структуры на излучение – участок А–В, т.е.

$$dR = \frac{dU}{dI} < 0; \quad dU < 0; \quad dI > 0.$$

Таким образом, результате воздействия стороннего ЭМИ, увеличение прямого тока сопровождается уменьшением напряжения на диоде.

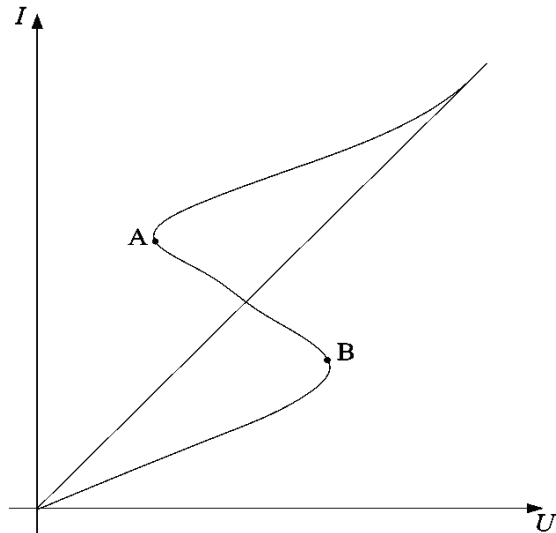


Рисунок 1 – Вольт-амперная характеристика диода (прямой ток) (А-В – искажение ВАХ в условиях воздействия ЭМИ)

Наличие области с отрицательным сопротивлением на вольт-амперной характеристике характеризует возможность появления одного из типов обратимых отказов (временного изменения ВАХ) как следствие трансформации энергии наведенного тока в энергию колебаний, которая излучается в окружающее пространство.

В результате потери энергии наведенного тока за время воздействия импульса напряжения $\Delta t_{имп}$ в процессе эксперимента можно оценить следующим соотношением:

$$\Delta W_{изл} = \Delta P_{изл} \Delta t_{имп} = I_{изл} U_{изл} \Delta t_{имп}, \quad (4)$$

где $I_{изл}$ – величина прямого тока диода на участке ВАХ (А–В, см. рис. 1);

$U_{изл}$ – напряжение на участке ВАХ (А–В, см. рис. 1) в условиях воздействия внешнего ЭМИ.

Экспериментальные исследования. Объектом исследования являются вольт-амперные характеристики следующих полупроводниковых приборов в условиях воздействия импульсного электромагнитного излучения:

– диод кремниевый, планарный с барьером Шоттки 2Д 922 2В,

– диод кремниевый эпитаксиальный КД 409 А.

Выбор в качестве объекта экспериментальных исследований указанных типов диодов обусловлен тем что диапазон их рабочих характеристик (силы тока и напряжения на участке прямого смещения) при длительности воздействующего импульса напряженности электрического поля с длительностью порядка нескольких сотен нс, и амплитуде импульса порядка 10–30 кВ/м определяют диапазон энергии излучения собственных электромагнитных колебаний полупроводниковых структур комплекующих эти приборы – $10^{-7} - 10^{-9}$ Дж. В этом же диапазоне лежит энергия излучения, определяемая, исходя из предложенной в настоящей работе физической модели.

При этом характер отклонения вольт-амперной

характеристики, полученной в ходе эксперимента (наличие участков с отрицательным сопротивлением) не зависел от амплитуды импульса воздействующего напряжения.

Эти приборы используются в быстродействующих импульсных устройствах для преобразования переменного напряжения. Электрические характеристики и параметры диодов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Электрические параметры диодов и требования к параметрам эталона РЭМП

Характеристики		2Д922В	ЕД409А	
Электрические параметры	Постоянный обратный ток, мкА	$T_1 = 25^\circ\text{C}$	$0,5(U_{\text{обр}}=10\text{В})$	
		$T_2 = 100^\circ\text{C}$	$10(U_{\text{обр}}=10\text{В})$	
	Общая емкость, пФ		$1,0(U_{\text{обр}}=0)$	$2,0(U_{\text{обр}}=15\text{В})$
	Индуктивность, нГн		1,0	4,0
Предельные эксплуатационные данные	Постоянное обратное напряжение, В		10	24
	Постоянный прямой ток, мА	$T_1 = 35^\circ\text{C}$	10	15
		$T_2 = 100^\circ\text{C}$		25
	Импульсный прямой ток, мА, $t_u < 10$ мкс, $Q \geq 10$	$T_1 = 25^\circ\text{C}$	20	500
		$T_2 = 100^\circ\text{C}$		250
Температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$		от -60°C до $+100^\circ\text{C}$		

Таблица 2 – Параметры воздействующего импульса

Параметр	Величина
1. Напряженность электрического поля, кВ/м	от 10^{-3} до 200
2. Напряженность магнитного поля, А/м	от 0,1 до 530
3. Длительность фронта импульса, не более, нс	1
4. Длительность импульса на уровне 0,5, не более, мкс	100
5. Размеры рабочего объема, не менее, мм: • в плане • по высоте	500x500 150

Экспериментальные исследования процессов влияния импульсного электромагнитного поля на работоспособность полупроводниковых приборов проводились с помощью Исходного Эталона Украины импульсных электрических и магнитных полей (далее – Эталон РЭМП) разработанного и созданного в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» [6].

Установка состоит из высоковольтного импульсного источника питания (ВИП), разряжаемого на полеобразующую систему (ПС) в виде симметричной замкнутой полосковой линии (ПЛ) (рис. 2).

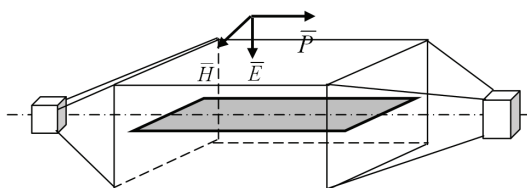


Рисунок 2 – Симметричная замкнутая полосковая линия

Источник ВИП генерирует однократные импульсы высокого напряжения, временные параметры которых приведены в табл. 1, а амплитуды этих импульсов должны обеспечивать создание необходимых уровней и H полей с учетом преобразования ПС.

Основные требования к ПС – это создание E и H полей с равномерной структурой, определенными направлениями векторов полей и легко рассчитываемыми амплитудами полей по геометрическим размерам ПЛС. Наиболее удовлетворяют указанным требовани-

ям к ПС направляющие системы типа полосковых линий (ПЛ).

Вдоль ПЛ распространяется плоская электромагнитная волна ТЕМ-типа, которая в любом поперечном сечении ПЛ имеет однозначное направление векторов E и H -полей. Габариты ПЛ определяют габариты рабочего объема, в котором располагался испытуемый объект (схема включения полупроводникового диода). При этом габариты ПЛ выбраны таким образом, чтобы волновое сопротивление ПЛ составляло 50 Ом.

При проведении экспериментальных исследований влияния ЭМИ на рабочие характеристики полупроводниковых диодов использовалась полосковая линия ПЛ-24 высотой 24 см, формирующая наносекундные импульсы, поскольку исследованные в работе механизмы влияния внешнего электромагнитного поля реализуются в данном временном диапазоне.

При проведении экспериментальных исследований один из указанных диодов последовательно соединялся с источником постоянного тока и сопротивлениями, одно из которых (R_1) позволяло менять силу тока диода (I), другое ($R_2 = 50$ Ом) – обеспечивало режим согласования с кабелем, ведущим к осциллографу (регистратору) (рис. 3).

Схема, за исключением диода, помещалась в экранированный объем и была вынесена за систему полеобразования. Сам объект, воздействия импульсного электромагнитного поля (диод) располагался между пластин полосковой линии. На рис. 3 показаны варианты расположения диода относительно воздействующего внешнего поля.

Постоянный прямой ток диода (I) увеличивался от 5 до 30 мА.

Временные параметры воздействующего импульса напряженности создаваемого в системе ПЛ:

- длительность фронта – 0,5 нс;
- длительность импульса напряженности ($\Delta t_{\text{имп}}$) – 500 нс.

В ходе эксперимента было исследовано влияние импульсного электромагнитного поля с амплитудами напряженности $E = 10$ кВ/м; 20 кВ/м; 30 кВ/м на величину результирующего импульса напряжения (U) на испытуемом объекте (диоде) (см. табл. 2).

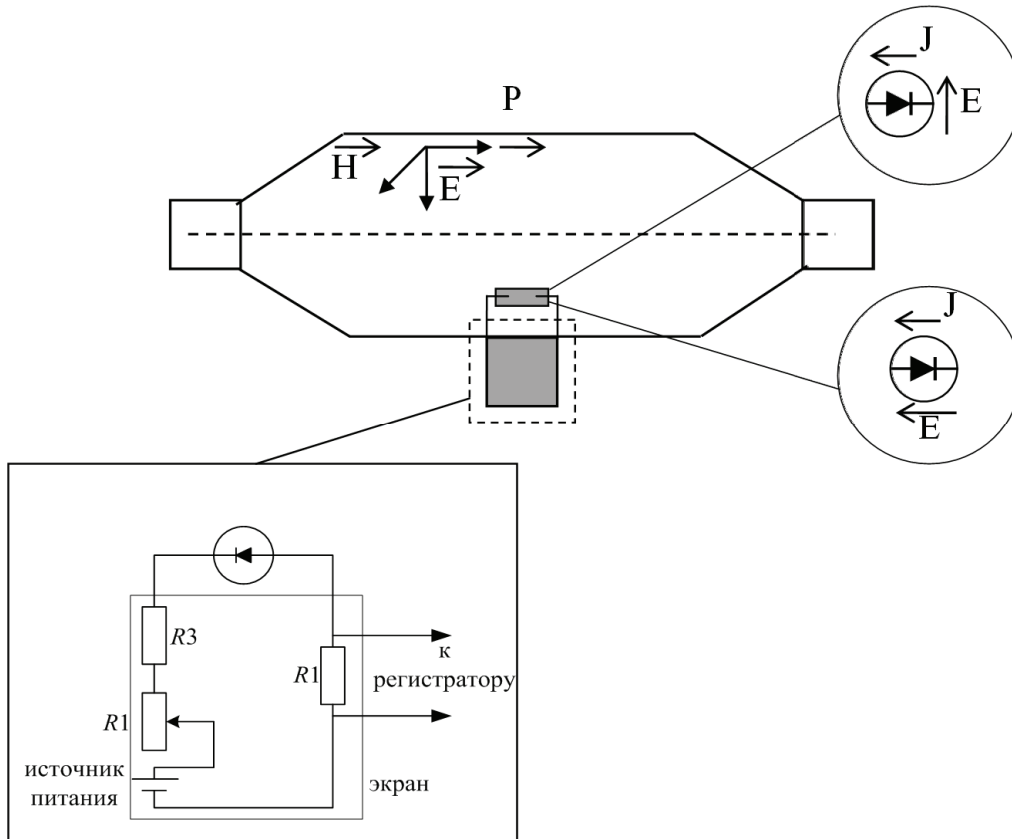


Рисунок 3 – Варианты расположения объекта испытаний в системе полеобразования.

Каждый шаг увеличения тока диода с интервалом $\Delta I = 5$ мА сопровождался воздействием импульса ЭМИ в системе полеобразования.

Эволюция амплитуды импульса напряжения (U) на диодах в зависимости от пошагового изменения прямого тока (I) при одновременном воздействии внешнего ЭМИ регистрировалась осциллографом.

Таким образом, были получены зависимости амплитуды импульса напряжения (U) от величины прямого тока диода (I) для каждого из указанных уровней воздействующего ЭМИ ($E = 10$ кВ/м; 20 кВ/м; 30 кВ/м) и определялся соответствующий участок вольт – амперной характеристики.

Зависимости амплитуд импульса напряжения от прямого тока диодов приведены соответственно в табл. 3. Полученные данные показывают, что с ростом тока наблюдается уменьшение амплитуды импульса напряжения, что соответствует участку ВАХ с отрицательным сопротивлением (участок А-В на рис. 1) – области генерации колебаний.

Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и расчетных данных

Приведем сравнительный анализ величин энергии излучения собственных колебаний полупроводниковых диодов 2 D922 В; KD409А, полученных экспериментально, с количественными оценками величины энергии излучения, полученных расчетным путем на основе физической модели обратимых отказов полупроводниковых приборов в предложенной работе.

Таблица 3 – Эволюция амплитуды импульса напряжения U (мВ) диод кремниевого эпитаксиального КД 409 А и кремниевого планарного с барьером Шоттки 2Д922В в зависимости от прямого тока диода I (мА)

KD409A Прямой ток диода I (мА)	Амплитуда импульса напряжения U (мВ)		
	$E=10$ кВ/м	$E=20$ кВ/м	$E=30$ кВ/м
5	950	1450	1650
10	930	1430	1620
15	910	1400	1600
20	840	1390	1580
25	800	1350	1450
30	740	1290	1410
2D922B Прямой ток диода I (мА)	Амплитуда импульса напряжения U (мВ)		
	$E=10$ кВ/м	$E=20$ кВ/м	$E=30$ кВ/м
5	1550	2950	3200
10	1520	2910	3150
15	1490	2870	3090
20	1450	2800	2950
25	1440	2760	2940
30	1410	2700	2820

В результате эксперимента было установлено, что увеличение прямого тока диода 2 D922 В в диапазоне $\Delta I \approx 5-30$ мА (амплитуда импульса воздействующего напряжения лежит в пределах $E_0 \approx 10-30$ кВ/м) приводит к падению амплитуды импульса напряжения на диоде в пределах $\Delta U \approx 1550-2800$ мВ. Это означает, что на вольт – амперной характеристике диода появляется участок с отрицательным сопротивлением (участок А-В рис. 1).

При длительности импульса $\Delta t_{\text{имп}} \approx 500$ нс, диапазон энергии излучения, определяемый с помощью соотношения (4), составляет $\Delta W_{\text{изл}} \approx 0,6 \cdot 10^{-9} - 1,2 \cdot 10^{-8}$ Дж.

Для диода КД409А, при аналогичных параметрах воздействующего импульса и в тех-же диапазонах прямого тока падение амплитуды импульса напряжения на диоде находится в пределах $\Delta U \approx 950 - 1400$ мВ, а энергия излучения составляет $\Delta W_{\text{изл}} \approx 0,3 \cdot 10^{-9} - 0,8 \cdot 10^{-8}$ Дж.

Определим теперь энергетические потери потоков заряженных частиц, наведенных внешним импульсным излучением на возбуждение собственных колебаний твердотельных структур, используя предложенную в работе физическую модель обратимых отказов (соотношение (3)).

Величины параметров, определяющих величину $\Delta W_{\text{изл}}$, можно оценить, используя существующие экспериментальные зависимости величины наведенных токов в кремниевых структурах, комплектующих исследуемые объекты – диоды [4] от напряженностей внешнего электрического поля E_0 (т.е. величины концентрации электронов наведенного тока n_b (ленгмюровской частоты электронов наведенного тока

$$\omega_b^2 = \frac{4\pi e^2 n_b}{m})$$
 и дрейфовой скорости v_0 .

При изменении параметров воздействующего импульса, аналогичных использованному в эксперименте ($E_0 \approx 10 - 30$ кВ/м, $\Delta t_{\text{имп}} \approx 500$ нс) для исследуемых кремниевых диодов 2Д 922 В и КД 409 А они лежат в диапазоне: $n_b \approx 10^{10} - 10^{12}$ см $^{-3}$; $v_0 \approx 10^6 - 10^7$ см/с; $\omega_b \approx 10^9$ с $^{-1}$.

Собственные частоты (поверхностные поляритоны) структур ω_1 , комплектующих диоды, определяются величиной ленгмюровских колебаний

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_0}{m}},$$
 т.е. концентрацией n_0 электронов полупроводника, комплектующих диоды – $\omega_1 \approx \omega_0 \approx 10^{10} - 10^{11}$ с $^{-1}$ [11].

Величина $\Delta W_{\text{изл}}$ при этом, согласно (3), составляет $10^{-7} - 10^{-9}$ Дж.

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных показывает, что величина энергии переходного излучения для исследованных полупроводниковых приборов (диодов) определяется одним порядком величины $\Delta W_{\text{изл}} \approx 10^{-7} - 10^{-9}$ Дж и имеет общие тенденции роста величины энергии излучения в зависимости от физических параметров комплектующих материалов и характеристик (увеличения амплитуды) воздействующего импульса напряжения.

Выводы

1. Обоснована постановка экспериментальных исследований предложенной в работе [6] физической модели возникновения обратимых отказов (влияния наведенных электромагнитным излучением токов на вольт-амперные характеристики полупроводниковых приборов). Определены области параметров внешнего электромагнитного излучения при которых реализуется

данная физическая модель (амплитуда напряженности электрического поля $E < 100$ кВ/м, длительность импульса $\Delta t_{\text{имп}} \approx 10^2 - 10^3$ нс).

2. Проведены экспериментальные исследования влияния импульсного электромагнитного излучения (амплитуда напряженности электрического поля $E \approx 10 - 30$ кВ/м, длительность импульса $\Delta t_{\text{имп}} \approx 500$ нс) на вольт – амперные характеристики участков прямого тока диодов (кремниевого планарного с барьером Шоттки 2Д922В, кремниевого эпитаксиального КД409А). Они показали наличие участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением, характеризующие режим генерации собственных колебаний данных приборов (увеличение прямого тока при падении напряжения).

3. Результаты сравнительного анализа полученных в настоящей работе экспериментальных и расчетных данных позволяют использовать предложенную физическую модель обратимых отказов и полученные на ее основе расчетные соотношения для определения критериев возникновения и количественных характеристик обратимых отказов полупроводниковых диодов в условиях воздействия импульсного электромагнитного излучения. (появлению S-образных участков прямого тока).

Список литературы

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

11. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения. 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 [Electromagnetic phenomena of the microwave range in inhomogeneous semiconductor structures]. Kyiv: Naukova dumka. 1991. 216 p.
2. Zi C. Fizika poluprovodnikovyh priborov [Physics of semiconductor devices]. Moscow: Mir. 1984. 456 p.
3. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Jelektromagnitnye vlijanja na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz'. 1979. 225 p.
4. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela [Electromagnetic influences on communications structures]. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p.
5. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam [Ensuring the durability of communication equipment to ionizing electromagnetic radiation]. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 p.
6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhij jelektroradioizdelij [Influence of external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2009. No 11. P. 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". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2012. № 21. P.154-161.

8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnogo jelektromagnitnogo vozdejstvija [Generation of electromagnetic oscillations of a semiconductor structure under conditions of external electromagnetic influence]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2012. No 21. P. 161-169.

9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhenykh chastic. Navedennogo vneshnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhij jelektroradioizdelij [Influence of the flow of charged particles. Induced by external electromagnetic radiation, on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 83-89.

10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatushanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh struktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija [Attenuation of surface oscillations of semiconductor structures of electronic products under conditions of exposure to external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 96-103.

11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnogo jelektromagnitnogo izluchenija [Kinetic mechanisms of interaction of surface oscillations with conduction electrons of semiconductor structures under the influence of external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 103-111.

Поступила (received) 27.09.2019.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Князев Володимир Володимирович (Князев Владимир Владимирович, Kniaziev Volodymyr) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник; м. Харків, Україна; ORCID 0000-0002-7119-7790; e-mail: knyaz2@i.ua.

Кравченко Володимир Іванович (Кравченко Владимир Иванович, Kravchenko Volodymyr Ivanovych) – доктор технічних наук, професор, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», головний науковий співробітник; м. Харків, Україна; e-mail: tc22@i.ua.

Яковенко Ігор Володимирович (Яковенко Игорь Владимирович, Yakovenko Igor Vladimirovich) – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри Системи інформації Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», головний науковий співробітник; м. Харків, Україна; тел. (057) 707 66 18; e-mail: yakovenko60IV@ukr.net

УДК 621.317.3

V.V. КНЯЗЬВ, П.М. МЕЛЬНИКОВ, О.Ю. ЧЕРНУХІН**СТВОРЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКА УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ
ВИПРОБУВАНЬ ІМПУЛЬСНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОЛЕМ ЩО СУПРОВОДЖУЄ БЛИСКАВКУ**

Здійснено аналіз вимог стандарту НАТО АЕСТР 250:2014 стосовно випробувань за видом NL254-E. Розділ 254.4 стандарту АЕСТР-250:2014 присвячений розгляду амплітудно-часових параметрів та ефектів прямих та непрямих ударів блискавки, які використовуються при випробуваннях об'єктів військової техніки (ОВТ) на блискавкостійкість. Непрямі удари блискавки, це розряди блискавки на відстані не менш 10 м від ОВТ, характеризуються електричними та магнітними полями. Ці поля мають аббревіатуру NL254-E (електричне поле) та NL254-H (магнітне поле). Напруженості цих полів наведено у табл. 254-6 стандарту АЕСТР-250:2014. Виявлено суттєву розбіжність між значеннями швидкості наростання напруженості електричного поля регламентовані стандартом НАТО АЕСТР 250:2014 та військовим стандартом США MIL STD 464C:2010. У даній статті описано установку для генерування імпульсу електричного поля. Розроблено варіант реалізації експериментального зразка установки та схеми випробувань. Створено експериментальний зразок установки, яка забезпечує генерацію імпульсного електричного поля з нормованими параметрами, які відповідають вимогам стандарту США MIL STD 464C:2010. Надамо докази відповідності вихідних параметрів установки вимогам стандарту. Дослідження спрямовано на створення в Україні національної системи оцінювання відповідності зразків ОВТ вимогам стандартів НАТО та військових стандартів США з електромагнітної сумісності (ЕМС).

Ключові слова: стандарт НАТО, об'єкт військової техніки, електромагнітна сумісність, випробування, імпульсне електричне поле.

V.V. КНЯЗЬВ, П.М. МЕЛЬНИКОВ, А.Ю. ЧЕРНУХІН**СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ
ИСПЫТАНИЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРИЧНЫМ ПОЛЕМ СОПРОВОЖДАЮЩИМ МОЛНИЮ**

Осуществлен анализ требований стандарта НАТО АЕСТР 250:2014 в отношении испытаний по виду NL254-E. Раздел 254.4 стандарта АЕСТР-250:2014 посвящен рассмотрению амплитудно-временных параметров и эффектов прямых и косвенных ударов молнии, которые используются при испытаниях объектов военной техники (ОВТ) на молниестойкость. Косвенные удары молнии, это разряды молнии на расстоянии не менее 10 м от ВВТ, характеризуются электрическими и магнитными полями. Эти поля имеют аббревиатуру NL254-E (электрическое поле) и NL254-H (магнитное поле). Напряженности этих полей приведены в табл. 254-6 стандарта АЕСТР-250:2014. Выявлено существенное различие между значениями скорости нарастания напряженности электрического поля, регламентируемой стандартом НАТО АЕСТР 250:2014 и военным стандартом США MIL STD 464C:2010. В данной статье описано установку для генерирования импульса электрического поля. Разработан вариант реализации экспериментального образца установки и схемы испытаний. Создан экспериментальный образец установки, которая обеспечивает генерацию импульсного электрического поля с нормированными параметрами, которые соответствуют требованиям стандарта США MIL STD 464C:2010. Предоставлены доказательства соответствия выходных параметров установки требованиям стандарта. Исследование направлено на создание в Украине национальной системы оценки соответствия образцов ВВТ требованиям стандартов НАТО и военных стандартов США по электромагнитной совместимости (ЭМС).

Ключевые слова: стандарт НАТО, объект военной техники, электромагнитная совместимость, испытания, импульсное электрическое поле.

V.V. KNAZIEV, P.M. MELNIKOV, O.YU. CHERNUKHIN**CREATION OF AN EXPERIMENTAL SAMPLE OF INSTALLATION FOR IMPLEMENTATION
OF TESTS BY PULSE ELECTRIC FIELD ASSOCIATING LIGHTNING**

An analysis of the requirements of the Standard NATO АЕСТР 250:2014 with respect to tests of type NL254-E was carried out. Section 254.4 of the Standard АЕСТР-250:2014 is devoted to the consideration of the amplitude-time parameters and effects of direct and indirect lightning strikes, which are used when testing objects of military equipment (OME) for lightning resistance. Indirect lightning strikes, these are lightning discharges at a distance of at least 10 m from the military equipment, are characterized by electric and magnetic fields. These fields are abbreviated as NL254-E (electric field) and NL254-H (magnetic field). The intensity of these fields are given in table 254-6 АЕСТР-250:2014. A significant discrepancy was found between the values of the rate of increase of electric field intensity regulated by NATO АЕСТР 250:2014 and the US military standard MIL STD 464C:2010. This article describes an installation for generating an electric field pulse. A variant of the implementation of the experimental installation model and test design has been developed. An experimental model of the installation has been created, which provides the generation of a pulsed electric field with normalized parameters that meet the requirements of the MIL STD 464C:2010. Evidence of compliance of the output parameters of the installation with the requirements of the Standard is provided. The study is aimed at creating in Ukraine a National system for assessing the compliance of OME samples with NATO standards and US military standard for electromagnetic compatibility (EMC).

Keywords: NATO standard, object of military equipment, electromagnetic compatibility, tests, pulsed electric field.

Вступ. Дослідження спрямовано на розробку та впровадження комплексу науково-технічних заходів щодо забезпечення відповідності об'єктів військової техніки (ОВТ) України сучасним вимогам НАТО з електромагнітної сумісності (ЕМС), які є обов'язковими для більшості видів ОВТ у зв'язку із широким застосуванням електронних систем керування, обробки даних, автоматизованого прийняття рішень та інше. Такі системи вкрай вразливі до впливу зовнішніх електромагнітних завад природного та штучного (навмисного) походження та можуть функціонувати у нештатному режимі за розміщення в обмеженому просторі декількох систем. Для досягнення мети з реалізації вимог національних стандартів України в галузі ЕМС ОВТ гармонізованих з відповідними стандартами НАТО, яким надано чинності з 01.02.2018 року, розроблено та введено в дію експериментальні зразки необхідного випробувального обладнання та засобів вимірювальної техніки, розроблено методики проведення випробувань. В наслідок реалізації проекту українські виробники матимуть можливість підтвердити відповідність створених зразків ОВТ вимогам стандартів НАТО з ЕМС шляхом проведення випробувань. Без реалізації цих заходів зразки українських ОВТ будуть втрачати рівень боєздатності та конкурентної спроможності на світовому ринку.

В усіх розвинутих країнах активно проводяться дослідження щодо створення потужних деструктивних електромагнітних завад, спроможних виводити з ладу системи керування ОВТ, наприклад, безпілотними літальними апаратами. Крім того, існує низка ефектів пов'язаних з природою функціонування технічних засобів. Не можливо також виключити ймовірність впливу інтенсивних електромагнітних завад в наслідок прямого або непрямого удару блискавки. Враховуючи принципову важливість проблеми, результати досліджень, які здійснено в більшості у наукових структурах Міністерства оборони США, узагальнено у таких стандартах: MIL STD 461G:2011 та MIL STD 464C:2010. На базі цих стандартів розроблено відповідні стандарти НАТО: АЕСТР 500 та АЕСТР 250. Вказані стандарти, містять вимоги щодо 25 видів випробувань, у тому числі такі, що є наслідком подій низької ймовірності, наприклад, електромагнітного імпульсу висотного ядерного вибуху.

Стандарти містять вимоги до вихідних параметрів генераторів електромагнітних завад та лише спрощені електричні схеми. Загальні питання викладено у багатьох монографіях, які не надають жодних рекомендацій стосовно конструкції генераторів. Деталі практичної реалізації зазвичай є комерційною таємницею розробників, тому відповідна інформація відсутня у відкритому доступі. На сайтах виробників міститься лише інформація про вихідні параметри генераторів. Необхідне обладнання розробляється за більшості компаніями Німеччини, США та Швейцарії, тому обслуговування та здійснення ремонту є дуже проблематичне. Принципово важливим є також розробка рекомендацій щодо узагальнення методів та технічних рішень із забезпечення необхідного рівня стійкості обладнання ОВТ до дії зовнішніх електромагнітних

завад. Наразі пріоритетними є питання пов'язані з безпілотними літальними апаратами.

Україна спроможна проектувати та створювати новітні зразки озброєння, військової техніки, унікальні зразки авіаційно-космічної техніки, які за технічними параметрами перевищують аналогічні зразки світових лідерів. При створенні, зазвичай, виникають проблеми як з внутрішньою так і зовнішньою електромагнітною сумісністю. Сучасні вимоги світового ринку включають обов'язкове експериментальне підтвердження рівня стійкості об'єктів при дії різноманітних електромагнітних впливів, параметри яких регламентовано стандартами НАТО та військовими стандартами США. Процедури сертифікації за цими стандартами в Україні поки не є чинними. Частина видів випробувань реалізовано у НДПКИ «Молнія» НТУ «ХПІ» в ініціативному порядку шляхом пристосування зразків генераторів завад розроблених для реалізації вимог стандартів ІЕС (обладнання загального використання) та стандарту США DO-160 (бортове обладнання літаків цивільної авіації). Досвід експлуатації вказує на суттєві переваги застосування власних генераторів у порівнянні з придбаними у іноземних компаній, насамперед, у обслуговуванні та поточному ремонті. Проведення випробувань зразків ОВТ в іноземних випробувальних лабораторіях пов'язані з такими ризиками (не беручи до уваги значні фінансові витрати):

- втрата іміджу при отриманні негативного результату, ймовірність якого дуже велика, якщо обладнання не пройде попередні заводські випробування;

- можливість втрати комерційної таємниці, враховуючи той факт, що на міжнародних ринках діє дуже жорстка конкурентна боротьба, в наслідок чого промисловий шпіднаж є невід'ємною частиною сучасного світу.

Тому, авіаційно-космічна держава, яка бажає бути у числі лідерів з розробки та реалізації озброєння, має проводити випробування у власних випробувальних центрах за стандартами НАТО та військовими стандартами США.

У даній статі наведено результати створення експериментального зразку установки для випробувань рівня несприйнятливості ОВТ до імпульсного електричного поля, яке утворюється блискавкою на відстані більш ніж 10 м.

Виконання цієї науково-дослідної роботи (номер державної реєстрації 0115U000611) здійснено у рамках замовлення Міністерства освіти і науки України на 2019 – 2020 роки.

Аналіз вимог стандартів. Технічні вимоги до параметрів імпульсних електричних полів блискавки наведено у табл. 254-6 стандарту [1]. Вони характеризуються напруженістю цих полів E за формулою (1) та швидкістю наростання електричного поля dE/dt за формулою (2):

$$E = 3 \cdot 10^6 / (1 + R^2/50^2)^{1/2}, \quad (1)$$

де E – амплітуда електричного поля, В/м;

R – відстань від каналу розряду блискавки, м.

$$dE/dt = 6 \cdot 10^{12} / (1 + R^2/50^2)^{1/2}. \quad (2)$$

Таким чином, максимальне значення швидкості наростання електричного поля при $R = 10$ м дорівнює $5,88 \cdot 10^{12} \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, а на відстані 50 м $4,28 \cdot 10^{12} \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Слід відзначити, що формули (1) та (2) дають значно завищені значення, у порівнянні зі середніми, що зазвичай використовують на практиці). Так, у табл. 8 військового стандарту США MIL-STD-464C:2010 [2], задається інше значення швидкості наростання електричного поля на відстані 10 м: $E = 6,8 \cdot 10^{11} \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, тобто на порядок менша. У роботі [3] та стандарті ДСТУ 3681-98 [4] для випробувань задано такі характеристики напруженості імпульсного електричного поля:

- максимальна напруженість до 300 кВ/м;
- тривалість фронту імпульсу – 100 мкс.

Середнє значення швидкості наростання такого імпульсу, яке розраховується як до досягнення максимального дорівнює $3 \cdot 10^9 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Нажаль, інші сучасні нормативні документи, які стосуються визначення параметрів факторів блискавки [5-12] не містить потрібної інформації щодо електричного поля.

Формально, регламентоване стандартом [1] максимальне значення $5,88 \cdot 10^{12} \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ означає, що за 1 мкс напруженість електричного поля повинна зрости до значення $5,88 \cdot 10^6 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$. При такій напруженості гарантовано здійснюється пробій повітряного проміжку, тому, що електрична тривкість повітря у однорідному електричному полі не перевищує $3,0 \cdot 10^6 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$. При наявності ОБТ електричне поле буде різко неоднорідним. В такому варіанті пробій матиме місце при напруженості електричного поля $5,0 \cdot 10^5 \text{ В/м}$, що узгоджується з вимогами стандарту [2]. Очевидно, що практична реалізація за таких вимог стандарту [1] під час випробувань зразка ОБТ не можлива. Маємо думку, що вказане значення швидкості наростання електричного поля є розрахунковим при диференціації формули, яка описує форму імпульсу напруженості електричного поля, а не середнє значення.

На основі порівняння наведених вище даних з різних нормативних документів зроблено висновок про розрахункову особливість вимог стандарту [1]. Тому, прийнято рішення у якості технічних параметрів до імпульсного електричного поля прийняти вимоги стандарту [2].

Важливе, що обидва стандарти [1, 2] не регламентують процедуру реалізації випробувань, а вказують на необхідність зробити це на національному рівні.

Реалізація установки. Враховуючи досвід інституту зі створення імітаторів електромагнітних полів для випробувань ОБТ великих розмірів, обрано варіант експериментального зразка установки з полеутворюючою системою у вигляді двох паралельних пластин. Основні складові елементи установки представлено на рис. 1.

Як видно з рис. 1, установка NL254-E має у своєму складі три основних елемента:

- генератор високовольтних імпульсів напруги (ГІН);
- полеутворюючу систему (ПУС);
- вимірювальний комплекс.

Система працює наступним чином:

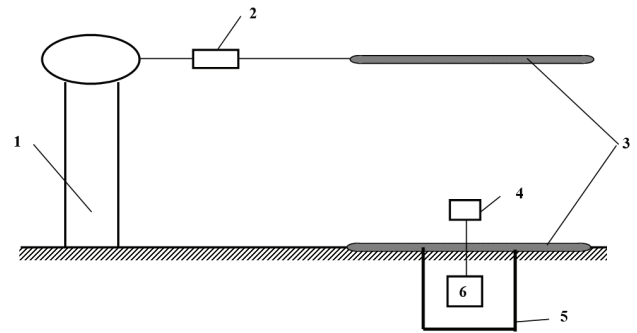


Рисунок 1 – Спрощена схема експериментальної випробувальної установки NL254-E:

- 1 – генератор імпульсів напруги ГІН;
- 2 – формуючий резистор;
- 3 – полеутворююча система ПУС;
- 4 – вимірювач Е-поля;
- 5 – вимірювальний бункер ВБ;
- 6 – осцилограф

ГІН з вихідною напругою, величина якої залежить від розмірів випробувального об'єму (від сотень кіловольт до одиниць мегавольт) розряджається на ПУС у вигляді двох паралельних пластин. При цьому, структура електричного поля всередині ПУС відповідає класичному варіанту структури Е-поля повітряного конденсатора з прямокутними електродами.

При створенні експериментального зразка випробувальної установки NL254-E використано енергетичну частину випробувального високовольтного стенду ВВС-1.2.

До складу ВВС-1.2 входять такі основні вузли:

- генератор імпульсної напруги ГІН-1.2 МВ;
- підвищувально-випрямний пристрій;
- універсальний блок підпалу;
- формуючий пристрій ФП;
- полеутворююча система ПУС;
- вимірювальний комплекс.

Структурна схема ВВС-1.2 представлена на рис. 2, а зовнішній вигляд на рис. 3. Слід зазначити, що до складу ВВС-1.2 входить генератор імпульсних струмів, який використовується для створення магнітного поля блискавки.

Всі високовольтні елементи стенду ВВС-1,2 розташовані на підлозі першого поверху зали загальною площею $22,73 \times 12,11 \text{ м}^2$. Цю частину стенду окремо огорожене металевою сіткою з дверима, обладнаними замком з клямкою та блокуванням. СКУ розміщена на другому поверсі в приміщенні пультової.

Генератор імпульсної напруги (ГІН-1,2) призначений для генерування грозових і комутаційних імпульсів напруги. Зовнішній вигляд ГІН-1.2 наведено на рис. 4.

ГІН складено за схемою Маркса на ізоляційній несучій конструкції етажерочного типу, яку змонтовано на прямокутній основі з ДСП-Б товщиною 40 мм.

Полеутворююча система (ПУС) у вигляді двох плоских електродів призначена для створення в робочому об'ємі імпульсів електричного поля з заданими амплітудно-часовими параметрами. Зовнішній вигляд ПУС наведено на рис. 5.

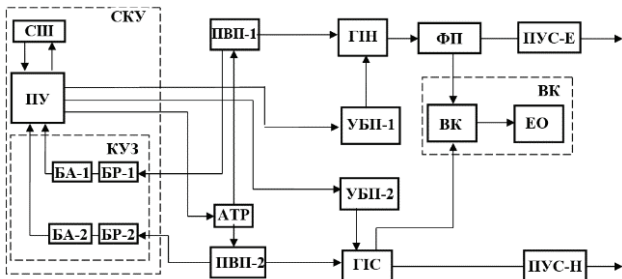


Рисунок 2 – Структурна схема випробувального високовольтного стенду ВВС-1.2 у режимі генерування Е-поля:

- СКУ – система контролю та управління;
- СПШ – силова шафа;
- ПУ – пульт управління;
- КУЗ – комплекс управління зарядом ГН та ГІС;
- БА-1, БА-2 – блок автоматики;
- БР-1, БР-2 – блок резисторів;
- АТР – автотрансформатор;
- ПВП-1, ПВП-2 – підвищувально-випрямний пристрій;
- ГН – генератор імпульсних напруг;
- ГІС – генератор імпульсних струмів;
- УБП-1, УБП-2 – універсальний блок підпалу;
- ФП – формуючий пристрій;
- ЕК – екранована кабіна;
- ВК – вимірювальний комплекс;
- ЕО – електронний осцилограф

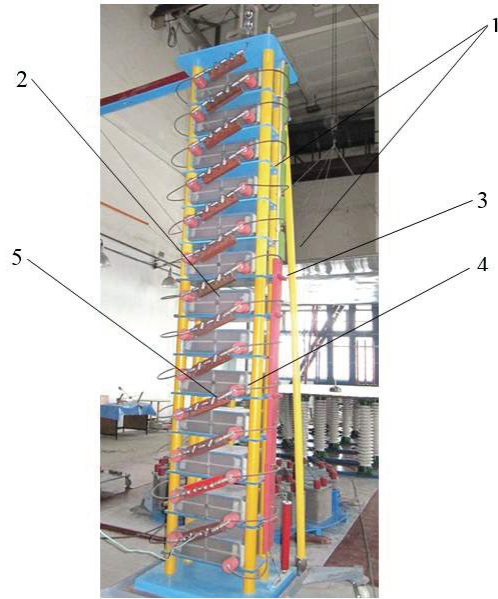


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд ГН-1.2:

- 1 – несуча конструкція;
- 2 – конденсатор ІК-100-0,4;
- 3 – зарядно-розрядний резистор;
- 4 – демпфуючий резистор;
- 5 – багатоприміжковий комутатор БПК-100

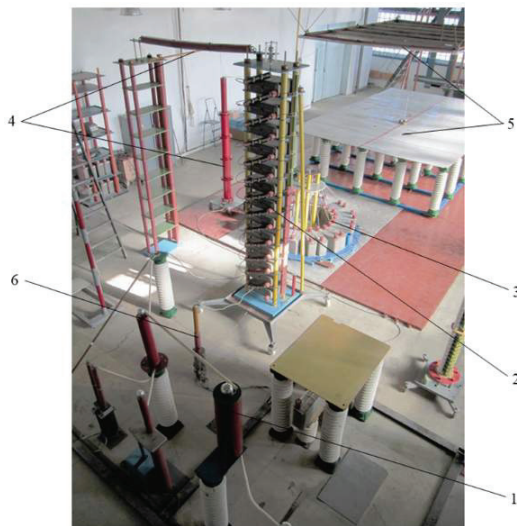


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд випробувального стенду:

- 1 – підвищувально-випрямний пристрій ПВУ-1;
- 2 – генератор імпульсної напруги;
- 3 – генератор імпульсних струмів;
- 4 – формуючий пристрій;
- 5 – полеутворююча система ПУС;
- 6 – універсальний блок підпалу

ПУС складається з двох паралельних металевих пластин, настилу і системи підвішування верхньої потенційної пластини. Верхня пластина являє собою площину з листового дюралюмінію товщиною 1 мм розміром 3,5 x 5,0 м², яка закріплена на несучій рамі, виготовленої з склопоксидних труб. Для зменшення крайових ефектів (неоднорідності електричного поля) по периметру краї пластини закрито екранами з дюралюмінієвих труб. Нижня пластина розміром 4,0 x 6,5 м² виготовлена з листового дюралюмінію



Рисунок 5 – Зовнішній вигляд ПУС:

- 1 – потенційний верхній електрод ПУС;
- 2 – уземлений нижній електрод ПУС;
- 3 – опорні ізолятори;
- 4 – канатна система підвісу верхньої площини

товщиною 1 мм. Площина закріплена на горизонтальному ізоляційному настилі на висоті 1 м від підлоги. Система підвіски призначена для регулювання відстані між пластинами в діапазоні від 0 до 5 м.

Вимірювальний бункер (ВБ) являє собою сталевий корпус, розмірами 3 x 4 x 2 м³, виготовлений з листової сталі товщиною 3 мм. Монтаж листів здійснено суцільним зварювальним швом. Каркас кабіни виконаний із сталевих кутів. Всередині кабіна обшита ізоляційними негорючими матеріалами. Вигляд кабіни представлений на рис. 6. Кабіна розташована у підземному поверсі, що забезпечує додатковий захист від зовнішніх джерел завад. Завадовий фон всередині кабіни при закритих дверях в діапазоні частот до 18 ГГц на рівні -100 дБм (рис. 7).



Рисунок 6 – Внутрішній вигляд ВБ

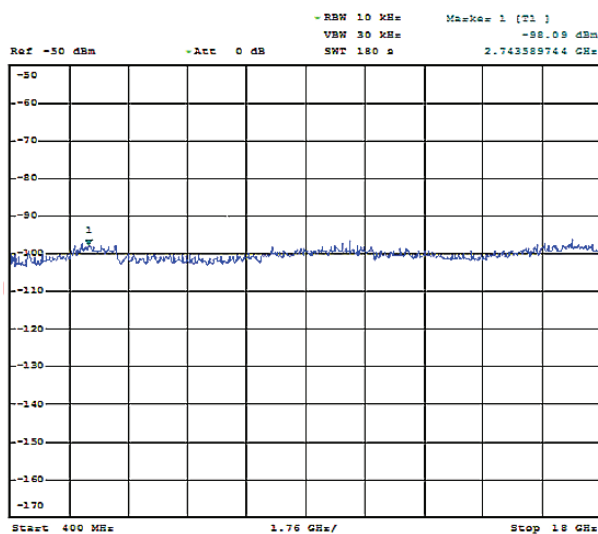


Рисунок 7 – Спектрограма рівня завад в ВБ:
За вертикаллю – дБм, за горизонталлю – частота
(діапазон від 400 МГц до 18 ГГц)

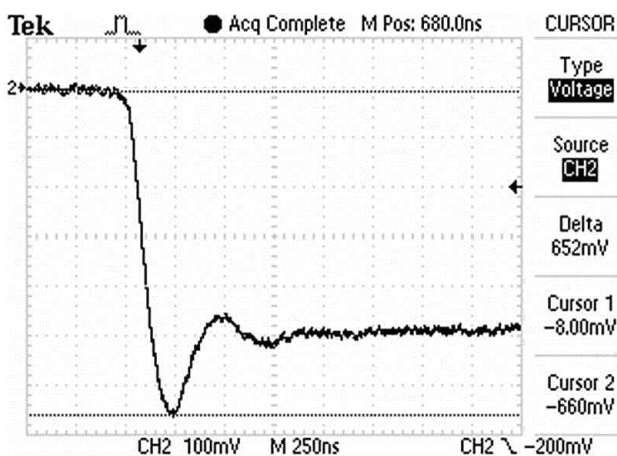


Рисунок 8 – Типова осцилограма напруги з виходу вимірювача ВНЕП-1К при зарядній нарузі ГІН – 15,7 кВ

Верифікація вихідних параметрів

Верифікація вихідних параметрів експериментального зразку установки NL254-E – це досягнення таких АЧП вихідних випробувальних імпульсів, які з

урахуванням невизначеності відповідають нормі $680 \text{ кВ/м/мкс} \pm 10 \%$, або відсоткам від неї (це потрібно для реалізації методики випробувань ОВТ, яка передбачає поступове підвищення напруженості поля). Для цього проведено серію із 10 послідовних розрядів ГІН на трьох рівнях зарядної напруги ГІН (рис. 8-10), розраховано для кожного імпульсу АЧП, на всю серію імпульсів розраховано невизначеності, а отримані результати занесено у табл. 1-3.

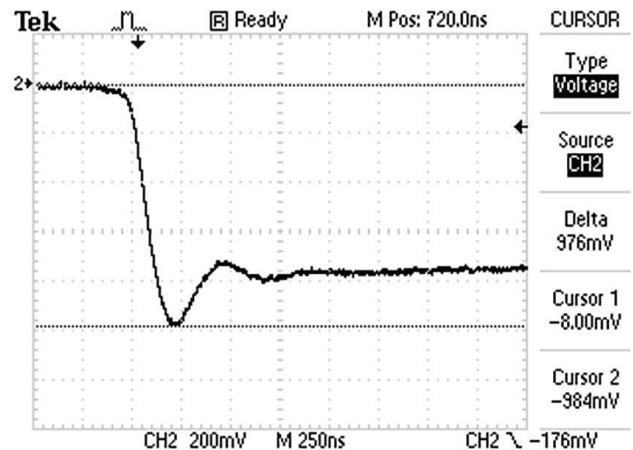


Рисунок 9 – Типова осцилограма напруги з виходу вимірювача ВНЕП-1К при зарядній нарузі ГІН – 24,5 кВ

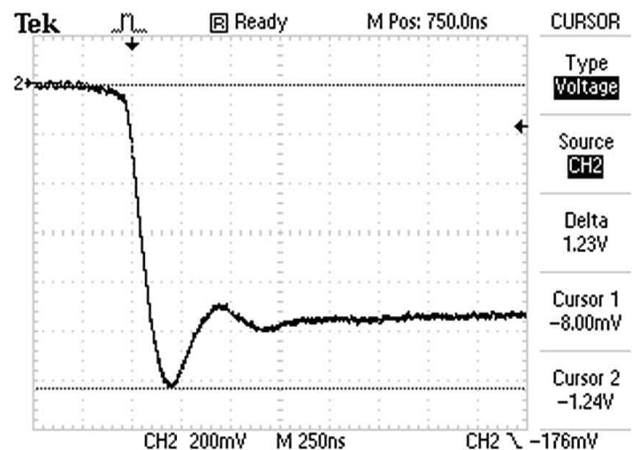


Рисунок 10 – Типова осцилограма напруги з виходу вимірювача ВНЕП-1К при зарядній нарузі ГІН – 30,5 кВ

Таблиця 1 – Розрахунок швидкості наростання електричного поля при зарядній нарузі 15,7 кВ

№	Амплітуда випроб. поля		$T_n^{0,1-0,9}$, мкс	dE/dt , кВ/м/мкс	$d\tilde{E}/dt$, кВ/м/мкс
	U_B , В	E_M , кВ/м			
1	0,60	65,9	0,2	329,5	329,3
2	0,61	66,9	0,2	334,5	
3	0,59	64,8	0,2	324,0	
4	0,61	66,9	0,2	334,5	
5	0,60	65,9	0,2	329,5	
6	0,61	66,9	0,2	334,5	
7	0,58	63,7	0,2	318,5	
8	0,59	64,8	0,2	324,0	
9	0,61	66,9	0,2	334,5	
10	0,60	65,9	0,2	329,5	

Таблиця 2 – Розрахунок швидкості наростання електричного поля при зарядній напрузі 24,5 кВ

№	Амплітуда випроб. поля		$T_n^{0,1-0,9}$, мкс	dE/dt , кВ/м/мкс	$d\tilde{E}/dt$, кВ/м/мкс
	U_0 , В	E_M , кВ/м			
1	0,976	107,3	0,2	536,5	536,5
2	0,985	108,3	0,2	541,5	
3	0,978	107,5	0,2	537,5	
4	0,995	109,4	0,2	547,0	
5	0,977	107,4	0,2	537,0	
6	0,975	107,2	0,2	536,0	
7	0,985	108,3	0,2	541,5	
8	0,976	107,3	0,2	536,5	
9	0,957	105,2	0,2	526,0	
10	0,956	105,1	0,2	525,5	

Таблиця 3 – Розрахунок швидкості наростання електричного поля при зарядній напрузі 30,5 кВ

№	Амплітуда випроб. поля		$T_n^{0,1-0,9}$, мкс	dE/dt , кВ/м/мкс	$d\tilde{E}/dt$, кВ/м/мкс
	U_0 , В	E_M , кВ/м			
1	1,24	136,3	0,2	681,5	681,5
2	1,25	137,4	0,2	687,0	
3	1,23	135,2	0,2	676,0	
4	1,26	138,5	0,2	692,5	
5	1,24	136,3	0,2	681,5	
6	1,26	138,5	0,2	692,5	
7	1,21	133,0	0,2	665,0	
8	1,22	134,1	0,2	670,5	
9	1,25	137,4	0,2	687,0	
10	1,24	136,3	0,2	681,5	

Висновки:

1. Дані у табл. 1 свідчать, що при зарядній напрузі ГІН 15,7 кВ $dE/dt = 329,3$ кВ/м/мкс, або 52,6 % від максимуму.

2. Дані у табл. 2 свідчать, що при зарядній напрузі ГІН 24,5 кВ $dE/dt = 536,5$ кВ/м/мкс, або 78,9 % від максимуму.

3. Дані у табл. 1 свідчать, що при зарядній напрузі ГІН 30,5 кВ $dE/dt = 681,5$ кВ/м/мкс, або 100,3 % від потрібного максимального значення 680 кВ/м/мкс.

4. Таким чином, забезпечено досягнення регламентованої стандартом [2] швидкості наростання електричного поля.

5. Забезпечена можливість здійснення випробувань несприйнятливості зразків ОВТ (з максимальним габаритним розміром 2 м) до дії електричного поля блискавки за вимог військового стандарту США MIL STD 464C:2010

Дослідження здійснено у рамках виконання науково-дослідної роботи «Розробка системи випробувань типових видів озброєння та військової техніки України за стандартами НАТО з електромагнітної сумісності» (Реєстраційний номер 0119U002571), яка фінансується Міністерством освіти і науки України.

Список літератури

1. AECTP-250 NATO Standard Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions. Edition C Version1, December 2014. 253 p.
2. MIL-STD-464C:2010 Electromagnetic environmental

effects. Requirements for systems. 165 p.

3. *Кравченко В.И.* Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. Харьков: Изд-во «НТМТ». 2010. 292 с.

4. ДСТУ 3681-98 (ГОСТ 30585-98) Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до дії грозових розрядів. Технічні вимоги та методи випробувань. Держстандарт України. Київ: 1999. 28 с.

5. IEC 62305-1:2011 Protection against lightning – Part 1: General principles. 72 p.

6. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications 15. Lightning Electromagnetics. IET Power and Energy Series 62. Institute of Engineering and Technology, London, UK, 2012. 917 p.

7. SMC Standard SMC-S-008 Electromagnetic compatibility requirements for space equipment and systems / Space and missile systems center Standard. Air force space command USA, 2008. 123 p.

8. SAE ARP 5412A Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. 56 p.

9. SAE ARP 5414A Aircraft Lightning Zoning. 33 p.

10. SAE ARP 5415 User's Manual for Certification of Aircraft Electrical. Electronic Systems for the Indirect Effects of Lightning. 2002. 222 p.

11. DO-160G/ED-14G:2011 Environmental conditions and test procedures for airborne equipment. 2011. 438 p.

12. SAE ARP 5416 Aircraft Lightning Test Methods. 2005. 145 p.

13. AECTP-250 NATO Standard Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions. Edition C Version1, December 2014. 253 p.

References (transliterated)

1. AECTP-250 NATO Standard Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions. Edition C Version1, December 2014. 253 p.

2. MIL-STD-464C:2010 Electromagnetic environmental effects. Requirements for systems. 165 p.

3. *Kravchenko V.I.* Molnija. Jelektromagnitnye faktory i ih porazhajushhee vozdejstvie na tehicheskie sredstva. Kharkiv: Izd-vo «NTMT». 2010. 292 p.

4. DSTU 3681-98 (GOST 30585-98) Sumisnist' tehnicnih zasobiv elektromagnitna. Stijkist' do dii grozovih rozrjadiv. Tehichni vimogi ta metodi viprobuvan'. Derzhstandart Ukraini. Kyuyiv: 1999. 28 p.

5. IEC 62305-1:2011 Protection against lightning – Part 1: General principles. 72 p.

6. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications 15. Lightning Electromagnetics. IET Power and Energy Series 62. Institute of Engineering and Technology, London, UK, 2012. 917 p.

7. SMC Standard SMC-S-008 Electromagnetic compatibility requirements for space equipment and systems / Space and missile systems center Standard. Air force space command USA. 2008. 123 p.

8. SAE ARP 5412A Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. 56 p.

9. SAE ARP 5414A Aircraft Lightning Zoning. 33 p.

10. SAE ARP 5415 User's Manual for Certification of Aircraft Electrical. Electronic Systems for the Indirect Effects of Lightning. 2002. 222 p.

11. DO-160G/ED-14G:2011 Environmental conditions and test procedures for airborne equipment. 2011. 438 p.

12. SAE ARP 5416 Aircraft Lightning Test Methods. 2005. 145 p.

13. AECTP-250 NATO Standard Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions. Edition C Version1, December 2014. 253 p.

Поступила (received) 07.11.2019

Князев Володимир Володимирович (Князев Владимир Владимирович, Kniaziev Volodymyr) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ», провідний науковий співробітник; м. Харків, Україна; ORCID 0000-0002-7119-7790; e-mail: knyaz2@i.ua.

Мельніков Петро Миколайович (Мельников Петр Николаевич, Melnikov Petro) - Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ», науковий співробітник; м. Харків, Україна.

Чернухін Олександр Юрійович (Чернухин Александр Юрьевич, Chernukhin Oleksandr) - Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ», науковий співробітник; м. Харків, Україна.

УДК 621.319

В.Е. МАРЦЕНЮК, А.А. ПЕТКОВ

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА ТОКА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В настоящее время эксплуатация различных технических средств проводится во все более сложной электромагнитной обстановке. Для проверки надежности эксплуатации технических средств они должны подвергаться испытаниям на стойкость к воздействию соответствующих электромагнитных факторов и, в частности, воздействию импульсов магнитного поля, что, в свою очередь, требует проведения дальнейших исследований, обеспечивающих разработку и создание современного испытательного оборудования. Во время эксплуатации технических средств на них воздействуют дестабилизирующие импульсные магнитные поля различной формы, основными из которых являются: колебательная и апериодическая. Целью настоящей статьи является разработка методики выбора оптимальных параметров генератора импульсов тока, который используется для формирования испытательных импульсов магнитного поля. При исследовании использовались методы моделирования переходных процессов в схеме формирования импульсов магнитного поля. По результатам моделирования определялись контролируемые параметры импульса, которые учитывались в банке данных. Использование банка данных обеспечивает следующие функции: проведение выбора параметров элементов схемы при заданных параметрах импульса тока и индуктивности системы поле образования; решение задач исследования формирующих возможностей схемы генератора; выбор оптимальных параметров разрядной цепи по ряду критериев. Создана открытая база данных значений безразмерных элементов разрядной цепи генератора магнитного поля, обеспечивающих формирование импульса тока с различным соотношением временных параметров. Предложена методика параметрического синтеза схемы генератора в режиме формирования апериодических импульсов магнитного поля, использующая сформированную базу данных. Материалы работы могут служить базой для дальнейшего исследования возможности формирования различных импульсов магнитного поля в генераторах с более сложной структурой, включающей рассмотренный генератор.

Ключевые слова: техническое средство, электромагнитная обстановка, банк данных, магнитное поле, генератор импульсов тока, апериодический импульс, колебательный импульс.

В.Є. МАРЦЕНЮК, О.О. ПЕТКОВ

ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРА СТРУМУ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ВИПРОБУВАЛЬНИХ ІМПУЛЬСІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

У теперішній час експлуатація різних технічних засобів проводиться в усе більш складній електромагнітній обстановці. Для перевірки надійності експлуатації технічних засобів вони повинні піддаватися випробуванням на стійкість до впливу відповідних електромагнітних факторів і, зокрема, впливу імпульсів магнітного поля, що, у свою чергу, вимагає проведення подальших досліджень, які забезпечують розробку й створення сучасного випробувального обладнання. Під час експлуатації технічних засобів на них впливають дестабілізуючі імпульсні магнітні поля різної форми, основними з яких є: коливальна й аперіодична. Метою даної статті є розробка методики вибору оптимальних параметрів генератора імпульсів струму, які використовуються для формування випробувальних імпульсів магнітного поля. При дослідженні використовувалися методи моделювання перехідних процесів у схемі формування імпульсів магнітного поля. За результатами моделювання визначалися контрольовані параметри імпульсу, які вносилися в банк даних. Використання банку даних забезпечує наступні функції: здійснення вибору параметрів елементів схеми при заданих параметрах імпульсу струму й індуктивності системи полеутворення; рішення задач дослідження формуючих можливостей схеми генератора; вибір оптимальних параметрів розрядного кола по ряду критеріїв. Створено відкриту базу даних значень безрозмірних елементів розрядного кола генератора магнітного поля, які забезпечують формування імпульсу струму з різним співвідношенням часових параметрів. Запропоновано мето-

дику параметричного синтезу схеми генератора в режимі формування аперіодичних імпульсів магнітного поля, яка використовує сформовану базу даних. Матеріали роботи можуть слугувати базою для подальшого дослідження можливості формування різних імпульсів магнітного поля в генераторах з більш складною структурою, яка включає розглянутий генератор.

Ключові слова: технічний засіб, електромагнітна обстановка, банк даних, магнітне поле, генератор імпульсів струму, аперіодичний імпульс, коливальний імпульс.

V. MARTSENIUK, A.A. PETKOV

SELECTION OF OPTIMAL PARAMETERS OF THE CURRENT GENERATOR FOR FORMING MAGNETIC FIELD TEST PULSES

Currently, the operation of various technical means is carried out in an increasingly complex electromagnetic environment. To verify the reliability of the operation of technical equipment, they must be tested for resistance to the effects of appropriate electromagnetic factors and, in particular, to the effects of magnetic field pulses, which, in turn, requires further research to ensure the development and creation of modern testing equipment. During the operation of technical equipment, they are affected by destabilizing pulsed magnetic fields of various shapes, the main ones are: vibrational and aperiodic. The purpose of this article is to development of a method for selecting the optimal parameters of a current pulse generator, which is used to form test magnetic field pulses. In the research, methods were used to simulate transients in a circuit for generating magnetic field pulses. Based on the simulation results, the controlled impulse parameters were determined, which were which were recorded in the data bank. Using the data bank provides the following functions: selection of parameters of circuit elements at given parameters of the current pulse and the field formation system inductance; solving the problems of researching the forming capabilities of the generator circuit; selection of optimal parameters of the discharge circuit according to a number of criteria. An open database of values of dimensionless elements of the discharge circuit of a magnetic field generator has been created, which ensures the formation of a current pulse with a different ratio of time parameters. The technique of parametric synthesis of the generator circuit in the mode of formation of aperiodic magnetic field pulses using the generated database is proposed. The materials of this work can serve as a basis for further research on the possibility of the formation of various magnetic field pulses in generators with a more complex structure, including generator that has been reviewed.

Keywords: technical tool, electromagnetic environment, data bank, magnetic field, current pulse generator, aperiodic pulse, vibrational pulse.

Введение. Интенсификация грозовой деятельности, которая является источником природных электромагнитных явлений, и электромагнитных процессов, возникающих в результате деятельности человека, приводит к тому, что в настоящее время эксплуатация различных технических средств (ТС) проводится во все более сложной электромагнитной обстановке.

Для проверки надежности эксплуатации ТС должны подвергаться испытаниям на стойкость к воздействию соответствующих электромагнитных факторов и, в частности, воздействию импульсов магнитного поля, что, в свою очередь, требует проведения дальнейших исследований, обеспечивающих разработку и создание современного испытательного оборудования.

Во время эксплуатации ТС на них воздействуют дестабилизирующие импульсные магнитные поля различной формы, например [1-4], основными из которых являются: колебательная и аперіодическая.

Формальное описание таких импульсов может быть представлено в виде строки-описания формы (SOF) [5, 6]:

$$SOF = (P) + (E) + (N), \quad (1)$$

где $(P) = \{1; 2\}$ – символ, определяющий полярность импульса;

$(E) = \{k_e; \infty\}$ – символ, определяющий количество экстремумов, $k_e \geq 1$;

$(N) = \{k_0; \infty\}$ – символ, определяющий количество переходов через «0», $k_0 \geq 0$.

Для сопоставления формы импульса с параметрами схемы, при которых имеет место данная форма, используется строка-описание параметров (SOP) [5] в виде наборов: (параметр схемы) \in (интервал значений).

Формирование импульсов магнитного поля осуществляется с использованием специальных электромагнитных систем, по которым протекают импульсы тока соответствующей формы (например [1, 7, 8]). Одна из схем, которые рекомендуются в ряде нормативных документов для формирования импульса магнитного поля, показана на рис. 1.

В [5] показано, что в схеме (см. рис. 1) в индуктивной нагрузке L_H могут быть сформированы импульсы тока различной формы. На рис. 2 показаны характерные формы импульсов тока (соответственно импульсы магнитного поля), которые реализуются в схеме (см. рис. 1): униполярный импульс с монотонным нарастанием и спадом значений (см. рис. 2, а), колебательный сильно затухающий импульс (см. рис. 2, б) и колебательный слабо затухающий импульс (см. рис. 2, в).

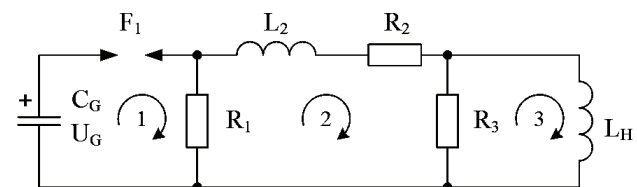


Рисунок 1 – Схема генератора импульсов магнитного поля:

U_G, C_G – напряжение зарядки и емкость генератора,

F_1 – коммутатор, R_1, R_2, R_3 – формирующие резисторы,

L_2 – формирующая индуктивность,

L_H – индуктивность системы полеобразования

На рис. 2 показаны следующие контролируемые при испытаниях амплитудно-временные параметры импульса тока: i_{\max} – максимальное значение импульса тока, i_{e2} – максимальное значение первой отрицатель-

ной полуволны (второе экстремальное значение тока), i_{e3} – максимальное значение второй положительной полуволны (третье экстремальное значение тока), $T_{H(0,1;0,9)}$ – время нарастания импульса тока между уровнями $0,1i_{max}$ и $0,9i_{max}$, $T_{I 0,5}$ – длительность импульса тока на уровне $0,5i_{max}$. В практике испытаний имеют место и иные способы определения временных параметров, которые характеризуют нарастание значений импульса и его длительность.

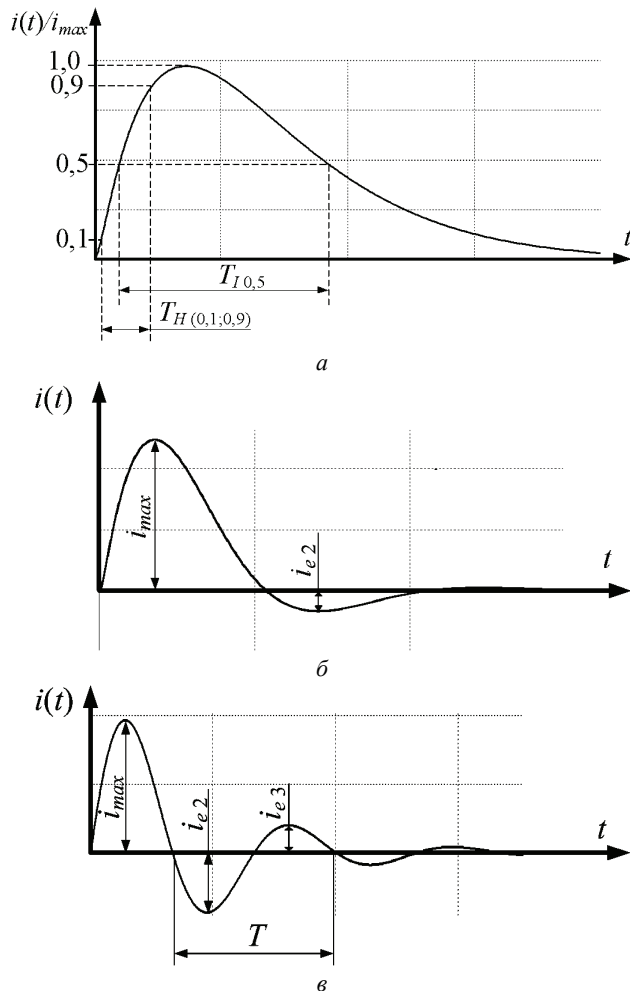


Рисунок 2 – Характерные импульсы тока

Под сильно затухающим колебательным импульсом тока (см. рис. 2) понимается импульс, для которого величина максимального значения второй положительной полуволны составляет не более 1 % от максимального тока в импульсе. Таким образом, для импульсов этого класса выполняется соотношение

$$i_{e3} / i_{max} \leq 0,01. \quad (2)$$

Для импульсов сильно затухающей (см. рис. 2, б) и слабо затухающей колебательной формы (см. рис. 2, в) определение контролируемых параметров, показанных на рис. 2, а, применяется к первой полуволне, которая должна иметь положительную полярность.

Для определения областей, в которых формируются характерные импульсы тока в системе полеобразования (нагрузке L_H), было проведено численное мо-

делирование, базирующееся на использовании безразмерных величин, определяющих переходный процесс [9]: $\tau = t / \sqrt{L_H C_G}$ – безразмерный аналог времени; $r_k = R_k / \sqrt{L_H / C_G}$, $k = \overline{1, 3}$ – безразмерные аналог активные сопротивлений;

$$I_J = \frac{i_J}{U_G} \sqrt{\frac{L_H}{C_G}}, \quad J = \overline{1, 3} \text{ – безразмерные аналоги контурных токов;}$$

где i_J – контурные токи; J – номер контура (направление обхода контуров показано на рис. 1); $L_{2H} = L_2 / L_H$ – безразмерный аналог индуктивности.

В результате исследования были определены области, в которых в нагрузке L_H формируются импульсы тока одной из характерных форм (рис. 3).

Как показано в [5], для аperiodического импульса тока отношение $T_{I 0,5} / T_{H(0,1;0,9)}$ имеет ограничение снизу. Поэтому для испытаний импульсами с меньшим отношением временных параметров используют сильно затухающие колебательные импульсы тока.

Возможность использования при испытаниях различных форм импульса тока определяется тем, что основные эффекты, связанные с воздействием магнитного поля на объекты, проявляются при заданных временных параметрах для импульсов различных видов. Естественно этот факт должен быть предварительно подтвержден теоретическими и / или экспериментальными исследованиями для конкретного типа испытываемых объектов.

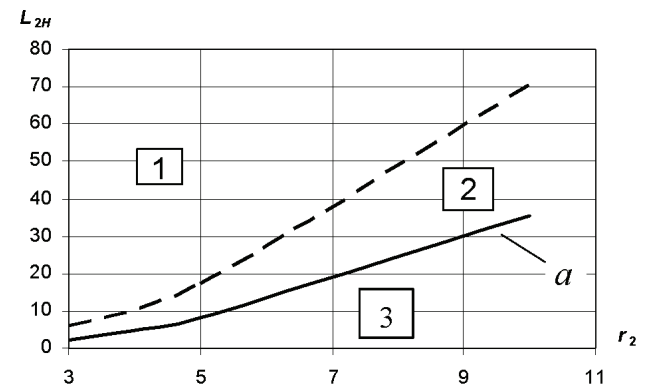


Рисунок 3 – Разделение областей формирования одно- и двухполярных импульсов тока: 1 – область формирования колебательных слабо затухающих импульсов тока; 2 – область формирования колебательных сильно затухающих импульсов; 3 – область формирования униполярных импульсов с монотонным нарастанием и спадом значений; а – граница униполярности формируемого импульса.

Как видно из проведенного анализа, рассмотренная схема генератора обладает широкими возможностями регулирования контролируемых параметров формируемого импульса тока (соответственно параметров импульса магнитного поля). Однако в литературе для данного генератора, кроме общих рекомендаций и ограниченного ряда соотношений параметров элементов, например [7], отсутствуют какие-либо соотношения, позволяющие при любых соотношениях

контролируемых параметров импульсов магнитного поля, выбрать формирующие элементы разрядной цепи, что существенно затрудняет процесс его проектирования.

Учитывая многовариантность реализации требуемых испытательных импульсов тока (магнитного поля), оправдана постановка задачи о выборе оптимальных значений параметров схемы разрядной цепи генератора, представленной на рис. 1.

Целью настоящей статьи является разработка методики выбора оптимальных параметров генератора импульсов тока, который используется для формирования испытательных импульсов магнитного поля.

Основные материалы исследований. Для реализации поставленной цели предлагается использовать банк данных, структурная схема которого показана на рис. 4.

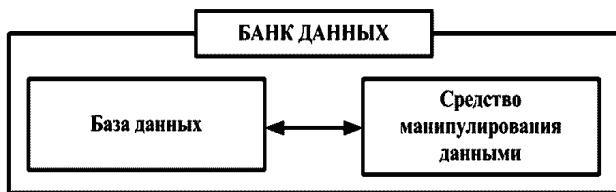


Рисунок 4 – Структурная схема банка данных

База данных представляет собой совокупность систематизированных результатов расчетов, доступных для обработки на ЭВМ представленную в виде записей, которые содержат следующую информацию (см. рис. 5):

а) строку-описание формы импульса тока – *SOF* (см. (1));

б) набор значений безразмерных параметров элементов схемы генератора, при которых реализуется данная форма импульса тока;

в) набор значений безразмерных контролируемых параметров импульса тока и их отношение, соответствующие данному набору безразмерных параметров элементов схемы генератора.

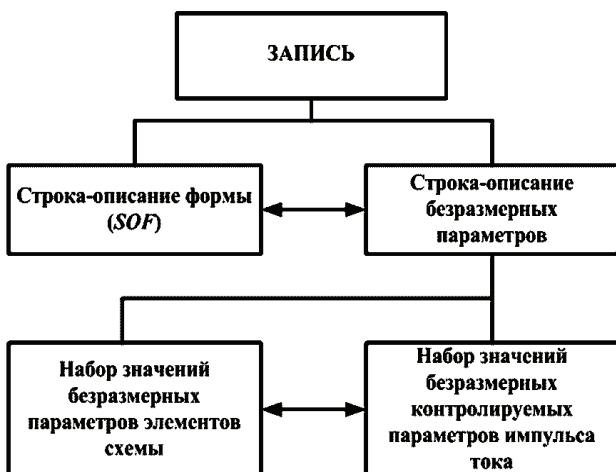


Рисунок 5 – Структура записи в базе данных

Элементы записи б) и в) в совокупности представляют собой строку-описание параметров (*SOP*).

Процедура формирования базы данных включает:

- генерирование исходных данных (безразмерных параметров схемы) исходя из практической необходимости процессов испытаний;

- проведение расчета переходного процесса с использованием системы схмотехнического моделирования (например, Micro Cap [10]);

- определение контролируемых параметров импульса тока, протекающего в системе полеобразования (например, как возможный вариант (безразмерные величины): максимальное значение тока – I_{max} , время нарастания тока до максимального значения – τ_H , длительность импульса – τ_I).

Исходные данные и определенные контролируемые параметры передаются в средство манипулирования данными (например, табличный процессор *Excel* [11]), чем завершается создание банка данных (совокупность базы данных и средств манипулирования данными). Следует отметить, что банк данных является открытой структурой и может в любой момент пополняться (объем базы данных определяется только возможностями компьютера).

Использование банка данных обеспечивает следующие функции:

а) проведение выбора параметров элементов схемы при заданных параметрах импульса тока и индуктивности системы поле образования (анализ процессов в разрядной цепи генератора);

б) решение задач исследования формирующих возможностей схемы, показанной на рис. 1 (влияние параметров разрядной цепи на форму импульса);

в) выбор оптимальных параметров разрядной цепи по следующим критериям:

- минимизация запасаемой энергии;
- минимизация величины зарядного напряжения;
- техническая реализуемость формирующих элементов разрядной цепи.

Рассмотрим выбор оптимальных параметров при параметрическом синтезе разрядной цепи в режиме генерирования аperiodических импульсов тока. Аналитическая постановка данной задачи рассмотрена в [12].

Аperiodический импульс тока определяется следующими амплитудно-временными параметрами: i_{max} – максимальное значение тока, T_H – время, характеризующее нарастание значений импульса, T_I – время, характеризующее длительность импульса. В частном случае возможный вариант определения указанных параметров, показан на рис. 2, а.

С практической точки зрения, аperiodическим импульсом можно считать любой из импульсов, показанных на рис. 2, для которого выполняется условие

$$|i_{e2} / i_{max}| \leq \delta, \quad (3)$$

где $0 \leq \delta < 1$ – наперед заданное значение, которое определяется условиями проведения испытаний и обычно не превышает значения 0,1.

Параметрический синтез начинается, исходя из имеющейся базы данных, с формирования набора ак-

туальных записей. Актуальной записью будем называть запись, которая одновременно удовлетворяет следующим условиям:

$$\begin{cases} |i_{e2} / i_{\max}| \leq \delta; \\ (\tau_I / \tau_H)_{ZAP} \in [(\tau_I / \tau_H)_{\min}, (\tau_I / \tau_H)_{\max}] \end{cases} \quad (4)$$

где $(\tau_I / \tau_H) = (T_I / T_H)_{ZAP}$ – отношение параметра, характеризующего длительность импульса к параметру, характеризующему его нарастание в актуальной записи;

$(\tau_I / \tau_H)_{\min} = (T_I / T_H)_{\min} = (T_I - \Delta T_I) / (T_H + \Delta T_H)$ – минимальное запрашиваемое значение отношения;

$(\tau_I / \tau_H)_{\max} = (T_I / T_H)_{\max} = (T_I + \Delta T_I) / (T_H - \Delta T_H)$ – максимальное запрашиваемое значение отношения;

$\Delta T_I, \Delta T_H$ – абсолютное допустимое отклонение соответственно параметра, характеризующего длительность импульса и параметра, характеризующего его нарастание от их номинальных значений.

Таким образом, совокупность актуальных записей представляет собой набор вариантов безразмерных параметров элементов схемы (рис. 1), при которых в нагрузке формируется импульс тока с требуемыми отношениями амплитудно-временных параметров.

Наличие такого набора позволяет решить ряд задач для оптимизации разрядной цепи генератора импульсов магнитного поля. Для этого для каждой актуальной записи определяется напряжение зарядки емкостного накопителя энергии, его емкость и запасаемая энергия исходя из следующих соотношений [5]:

$$U_G = L_H \frac{i_{3\max}}{I_{3\max}} \frac{\tau_{H(0,1;0,9)}}{T_{H(0,1;0,9)}}; \quad (5)$$

$$C_G = \frac{1}{L_H} \left(\frac{T_{H(0,1;0,9)}}{\tau_{H(0,1;0,9)}} \right)^2; \quad (6)$$

$$W_G = \frac{C_G U_G^2}{2}, \quad (7)$$

а также реальные параметры схемы (см. рис. 1) по следующим соотношениям, полученным исходя из выражений для безразмерных параметров схемы

$$L_2 = L_{2H} L_H; \quad (8)$$

$$R_k = r_k \sqrt{L_H / C_G}, \quad k = \overline{1, 3}. \quad (9)$$

Если набор содержит одну актуальную запись, то ее следует признать оптимальной. При наличии в наборе более одной актуальной записи можно произвести выбор варианта с минимальной запасаемой энергией емкостного накопителя, с минимальным напряжением его зарядки.

При использовании табличного процессора *Excel* процедура выбора актуальной записи с минимальными значениями параметров наиболее просто реализуется с использованием оператора сортировки данных или функции МИН.

При наличии в наборе более двух актуальных записей дополнительно можно выбрать вариант с минимальным напряжением зарядки.

На последнем этапе производится выбор варианта с параметрами элементов (определенными по соот-

ношениям (6), (8) и (9)), которые имеют наименьшие затраты и наиболее просты в технической реализации.

Выводы. Создана открытая база данных значений безразмерных элементов разрядной цепи генератора магнитного поля, обеспечивающих формирование импульса тока в системе полеобразования с соотношением временных параметров

$$\tau_{I0,5} / \tau_{H(0,1;0,9)} = 2,3 \dots 13,3.$$

Предложена методика параметрического синтеза схемы генератора в режиме формирования апериодических импульсов магнитного поля, использующая сформированную базу данных.

Материалы работы могут служить базой для дальнейшего исследования возможности формирования различных импульсов магнитного поля в генераторах с более сложной структурой, включающей рассмотренный генератор.

Список литературы

1. IEC 61000-4-9, Ed. 2.0: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-9: Testing and measurement techniques – Impulse magnetic field immunity test. IEC, 2016. 114 p.
2. MIL-STD-461G:2015 Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. 280 p.
3. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. Москва: Радио и связь, 1988. 296 с.
4. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. Москва: Радио и связь, 1991. 264 с.
5. Петков А.А. Формирующие возможности генератора импульсов магнитного поля // Электротехника и электромеханика. 2015. № 2. С. 68-71.
6. Кравченко В.И., Колушко Г.М., Петков А.А. Взаимосвязь структуры высоковольтных импульсных устройств и формы генерируемых импульсов. Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: междунар. науч. конф., 17-21 августа 2009 г.: тезисы докл. / Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины. Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2009. С. 119-120.
7. ДСТУ 2526-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до імпульсного магнітного поля. Технічні вимоги та методи випробувань : Держстандарт України. Київ: 1994. 26 с.
8. ДСТУ 2525-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до загасаючого змінного магнітного поля. Технічні вимоги та методи випробувань : Держстандарт України. Київ: 1994. 28 с.
9. Петков А.А. Генерирование испытательных импульсов магнитного поля. Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. Харків: НТУ «ХП». 2006. №37. С. 73-78.
10. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. Москва: Горячая линия-Телеком, 2003. 368 с.
11. Коттингхэм М. Excel 2000: руководство разработчика: пер. с англ. Киев: Издательская группа BVH, 2000. 704 с.
12. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии. Электротехника і електромеханіка. 2007. № 6. С. 70-75.

References (transliterated)

1. IEC 61000-4-9, Ed. 2.0: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-9: Testing and measurement techniques – Immunity magnetic field immunity test. IEC, 2016. 114 p.
2. MIL-STD-461G:2015 Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. 280 p.
3. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ionizirujushhim i jelektromagnitnym izlucheniham [Ensuring the durability of communication equipment to ionizing and electromagnetic radiation]. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 296 p.
4. Kravchenko V.I. Grozozaschita radioelektronnyh sredstv: Spravochnik [Lightning protection of radio electronic means: Directory] Moscow: Radio and communications Publ., 1991. 264 p.
5. Petkov A.A. Formiruyushchiye vozmozhnosti generatora impul'sov magnitnogo polya [Formative capabilities of the magnetic field pulse generator] Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2015. № 2. P. 68-71.
6. Kravchenko V.I., Koliushko G.M., Petkov A.A. Interconnection structure of high impulse device and forms generated pulses. Fizika impul'snyh razryadov v kondensirovannyh sredah : mezhdunar. nauch. konf., 17-21 avgusta 2009 g. : tezisy dokl. [Physics of pulsed discharges in condensed media: Intern. scientific. Conf., 17-21 August 2009: Abstracts]. Nikolaev: 2009. P. 119-120.
7. DSTU 2526-94. Compatibility of electromagnetic means. Resistance to impulse magnetic field. Technical requirements and test methods [Compatibility of electromagnetic means. Resistance to impulse magnetic field. Technical requirements and test methods]: Gosstandart of Ukraine. Kyiv: 1994. 26 p.
8. DSTU 2525-94. Sumisnist' tekhnichnykh zasobiv elektromagnitna. Stiykist' do zahasayuchoho zminnoho mahnitnoho polya. Tekhnichni vymohy ta metody vyprobuvan' [Compatibility of electromagnetic means. Resistance to damping alternating magnetic field. Technical requirements and test methods] : Derzhstandart Ukrayiny. Kyiv: 1994. 28 p.
9. Petkov A.A. Generirovanie ispytatelnyh impul'sov magnitnogo polya [The generation of test pulses of magnetic field]. Visnik NTU «HPI». Seriya: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage.] Kharkiv: NTU "KhPI". No.37. P. 73-78.
10. Razevig V.D. Skhemotekhnicheskoye modelirovaniye s pomoshch'yu Micro-Cap 7 [Circuit simulation using Micro-Cap 7]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2003. 368 p.
11. Kottinkhem M. Excel 2000: rukovodstvo razrabotchika [Excel 2000: Developer's Guide] : per. s angl. Kyiv: Izdatel'skaya gruppa BVH, 2000. 704 p.
12. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametric synthesis of high-voltage pulse test device with a capacitive energy storage. Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2007. No.6. P. 70-75.

Поступила (received) 31.10.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Марценюк Валентина Євгенівна (Марценюк Валентина Евгеньевна, Martseniuk Valentyna) – НТУ «ХПІ», старший викладач кафедри інженерної електрофізики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3842-4282>; e-mail: v.e.martseniuk@gmail.com

Петков Олександр Олександрович (Петков Александр Александрович, Petkov Alexander Alexandrovich) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ «ХПІ», професор кафедри інженерної електрофізики; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0101-0089>; e-mail: alexpetkov2014@gmail.com

УДК 621.314

А.С. МАСЛІЙ, Н.П. КАРПЕНКО, О.Г. ТУРЕНКО, О.Е. САФРОНОВ, П.А. ГОЛОВКО**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗУ**

Дана стаття присвячена дослідженню відносно нового типу електродвигуна: вентильно-індукторного на маневровому тепловозі. Даний двигун відноситься до класу синхронних реактивних машин з вентильним керуванням. На основі рівнянь Лагранжа була описана математична модель даного електромеханічного перетворювача, а також проводився комплекс цифрових експериментів з метою визначення залежностей між потокозчепленням фаз двигуна і їх похідними. За результатами аналізу магнітного поля методом кінцевих елементів були визначені значення потокозчеплення фаз вентильно-індукторного двигуна і значення електромагнітного моменту. За допомогою програмного середовища FEMM були отримані тривимірні поверхні, що показують залежність потокозчеплення фази та електромагнітного моменту від магніторушійної сили та кута повороту ротора, які в подальшому використані в імітаційній моделі вентильно-індукторного двигуна в середовищі Matlab. Проведено ідентифікацію параметрів двигуна ДВІ-165 та отримано його математичну модель на основі рівнянь Лагранжа II роду. У результаті моделювання отримані осцилограми прямого пуску, а саме моменту, струму та швидкості з обмеженням струму на рівні 600А.

Ключові слова: вентильно-індукторний двигун; електромеханічний перетворювач; маневровий тепловоз; імітаційна модель; метод кінцевих елементів; електронний комутатор.

© А.С. Маслій, Н.П. Карпенко, О.Г. Туренко, О.Е. Сафронов, П.А. Головка, 2019

A.C. МАСЛИЙ, Н.П. КАРПЕНКО, А.Г. ТУРЕНКО, О.Э. САФРОНОВ, П.А. ГОЛОВКО

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ПРИВОДА ДЛЯ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА

Данная статья посвящена исследованию относительно нового типа электродвигателя: вентильно-индукторного на маневровом тепловозе. Данный двигатель относится к классу синхронных реактивных машин с вентильным управлением. На основе уравнений Лагранжа была описана математическая модель данного электромеханического преобразователя, а также проводился комплекс цифровых экспериментов с целью определения зависимостей между потокосцеплением фаз двигателя и их производными. По результатам анализа магнитного поля методом конечных элементов были определены значения потокосцепления фаз вентильно-индукторного двигателя и значение электромагнитного момента. С помощью программной среды FEMM были получены трехмерные поверхности, показывающие зависимость потокосцепления фазы и электромагнитного момента от магнитодвижущей силы и угла поворота ротора, которые в дальнейшем использованы в имитационной модели вентильно-индукторного двигателя в среде Matlab. Проведена идентификация параметров двигателя ДВИ-165 и получена его математическая модель на основе уравнений Лагранжа второго рода. В результате моделирования получены осциллограммы прямого пуска, а именно момента, тока и скорости с ограничением тока на уровне 600А.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, электромеханический преобразователь; маневровый тепловоз; имитационная модель; метод конечных элементов; электронный коммутатор.

A. MASLIY, N. KARPENKO, O. TURENKO, O. SAFRONOV, P. GOLOVKO

MATHEMATICAL MODELING OF SWITCHED-RELUCTANCE ELECTRIC DRIVE FOR MANEUVERING DIESEL LOCOMOTIVE

This article is devoted to the study of a relatively new type of electric motor: a switched-reluctance motor on a maneuvering diesel locomotive. This engine belongs to the class of synchronous jet machines with valve control. On the basis of the Lagrange equations, a mathematical model of the electromechanical converter was described, and a set of digital experiments was conducted to determine the relationships between the coupling of the motor phases and their derivatives. According to the results of the magnetic field analysis, the values of the coupling of the phases of the valve-inductor motor and the values of the electromagnetic torque were determined by the finite element method. Three-dimensional surfaces were obtained using the FEMM software environment, showing the dependence of the phase and electromagnetic torque coupling on the magnetomotive force and the rotation angle of the rotor, which were subsequently used in a simulation model of a valve-inductor motor in the Matlab environment. The parameters of the engine DVI-165 are identified and its mathematical model is obtained based on Lagrange equations of the second kind. The simulation results in direct-start waveforms, namely, torque, current, and speed with 600A current limiting.

Keywords: switched-reluctance motor; electromechanical converter; maneuvering diesel locomotive; simulation model; finite element method; electronic switch.

Вступ. З розвитком напівпровідникової електроніки все більш широкого застосування знаходять вентильно-індукторні двигуни (ВІД). ВІД відноситься до класу синхронних реактивних машин з вентильним керуванням. ВІД представляє собою сукупність електромеханічного перетворювача енергії – індукторної машини (рис. 1) і електронного блоку керування. Необхідними частинами блоку керування є:

- блок керування (БК) комутацією, що містить алгоритм і систему керування електронним комутатором;
- датчики положення ротора (ДПР) і струму фази, які можуть виконуватися інтегрованими із блоком керування;
- електронний комутатор (ЕК), що забезпечує підключення обмоток індукторної машини до джерела живлення.

Принцип дії ВІД базується на реактивній взаємодії зубців статора й ротора. Зубці ротора, під дією струму, що протікає в котушках фази, намагаються зайняти положення, що відповідає найбільшому значенню енергії магнітного поля, що відповідає режиму двигуна [1-5].

В якості електромеханічного перетворювача енергії був обраний чотирифазний ВІД, який має конфігурацію 8/6 та представлений на рис. 2, а технічні характеристики зведені до табл. 1.

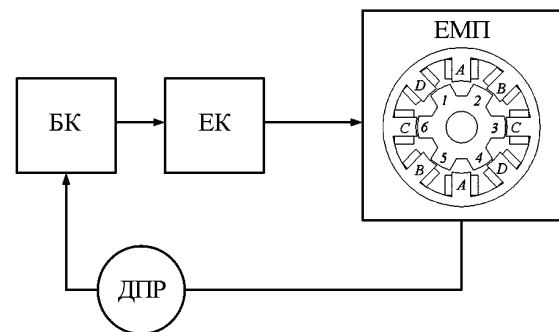


Рисунок 1 – Функціональна схема ВІД

Таблиця 1 – Технічні характеристики двигуна ДВИ-165

Електромеханічні параметри	
U_H , В	200
I_H , А	850
M_H , Нм	875,5
n_H , об/хв	1800
R_Φ , Ом	0,135
L_d , мГн	1,72
L_q , мГн	0,36

Метою даної роботи є розрахунок магнітного поля ВІД та побудова основних залежностей його роботи для подальшого використання в імітаційній моделі роботи ВІД.

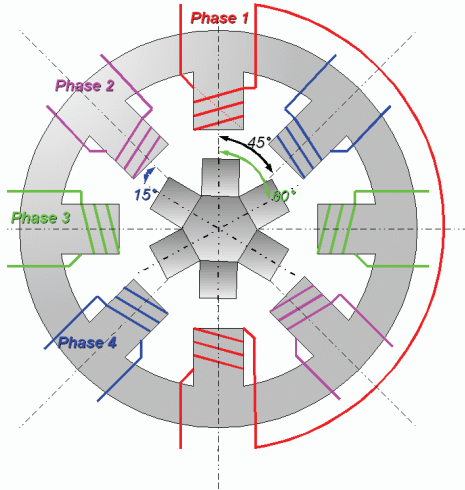


Рисунок 2 – Чотирифазний ВІД конфігурації 8/6

Постановка задачі. Для математичного опису такого ЕМП використовуємо систему диференціальних рівнянь на основі рівнянь Лагранжа:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_A}{dt} &= \frac{1}{\frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial i_A}} \left(e_A - r_A i_A - \frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right); \\ \frac{di_B}{dt} &= \frac{1}{\frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial i_B}} \left(e_B - r_B i_B - \frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right); \\ \frac{di_C}{dt} &= \frac{1}{\frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial i_C}} \left(e_C - r_C i_C - \frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right); \\ \frac{di_D}{dt} &= \frac{1}{\frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial i_D}} \left(e_D - r_D i_D - \frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right); \\ M_{\text{об}} &= f(i_A, i_B, i_C, i_D, \theta); \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{M_{\text{об}} - M_c}{J}; \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де i_A, i_B, i_C, i_D – струми відповідних фаз статора;
 $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_D$ – потокозчеплення відповідних фаз;

- e_A, e_B, e_C, e_D – напруга джерел живлення;
- θ – кут повороту ротора;
- ω – кутова швидкість;
- $M_{\text{об}}$ – рушійний момент;
- M_c – момент опору;
- J – момент інерції ротора.

Система рівнянь (1) представляє собою математичну модель ВІД. Для ідентифікації її параметрів необхідно встановити залежності між потокозчепленням фаз ($\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_D$), а також їх похідними ($\frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial i}, \frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial \theta}$), з одного боку і узагальненими координатами - з іншого. З метою визначення цих залежностей проводився комплекс цифрових експериментів. Для визначення значення потокозчеплення пропонується здійснювати розрахунок магнітного поля з використанням методу кінцевих елементів для плоскопаралельного завдання. За результатами аналізу магнітного поля можна визначити значення потокозчеплення фаз ВІД і значення електромагнітного моменту.

Для стаціонарного магнітного поля метод кінцевих елементів в двовірній розрахунковій моделі і прямокутній системі координат полягає в мінімізації нелінійного енергетичного функціонала. Для вирішення поставленого завдання використовувався програмний комплекс FEMM, що дозволяє розрахувати стаціонарні плоскопаралельні магнітні поля. За результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів можна визначити потокозчеплення обмоток, а також величину електромагнітного моменту.

Для стаціонарного магнітного поля метод кінцевих елементів в двовірній розрахунковій моделі і прямокутній системі координат полягає в мінімізації нелінійного енергетичного функціонала. Для вирішення поставленого завдання використовувався програмний комплекс FEMM, що дозволяє розрахувати стаціонарні плоскопаралельні магнітні поля. За результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів можна визначити потокозчеплення обмоток, а також величину електромагнітного моменту.

$$\Psi_A = l_\delta \sum_K w_{AK} (A_{n,A} - A_{1,A}); \quad (2)$$

$$\Psi_B = l_\delta \sum_K w_{BK} (A_{n,B} - A_{1,B}); \quad (3)$$

$$\Psi_C = l_\delta \sum_K w_{CK} (A_{n,C} - A_{1,C}); \quad (4)$$

$$\Psi_D = l_\delta \sum_K w_{DK} (A_{n,D} - A_{1,D}); \quad (5)$$

де l_δ – довжина статора;
 $A_{n,A}, A_{n,B}, A_{n,C}, A_{n,D}$ – потенціали у провідниках однієї секції фази А, В, С, D;
 k – кількість секцій фази;
 w_K – кількість витків секції.

$$\vec{M} = \frac{1}{2} l_\delta \int_{l_r} \left((\vec{H} \times (\vec{B} \times \vec{n}) + \vec{B} \times (\vec{H} \times \vec{n})) \times \vec{r} \right), \quad (6)$$

де l_r – контур інтегрування.

Таким чином, вирази (2) - (5) і (6) являють собою потокозчеплення і електромагнітний момент як функцію двох змінних (струму фази, а також кутової координати ротора), які можуть бути визначені шляхом розрахунку магнітного поля машини на кожному кроці інтегрування.

У постпроцесорі FEMM для розрахункової моделі ВІД задаємося збуджуючим впливом шляхом завдання величини струму котушки, намотаної на зубець статора. Також приймаємо, що котушка має один виток. У кожній замкнутій області машини задаємо матеріал і провідність даної ділянки машини. Криві намагнічування матеріалу зубців статора і ротора взяті з довідкової літератури. При розрахунках прийнято, що використовується електротехнічна сталь марки 2411.

Розподіл магнітних ліній в розрахунковій схемі ВІД під час узгодженого і неузгодженого положень при включеній фазі А представлені на рис. 3 та 4.

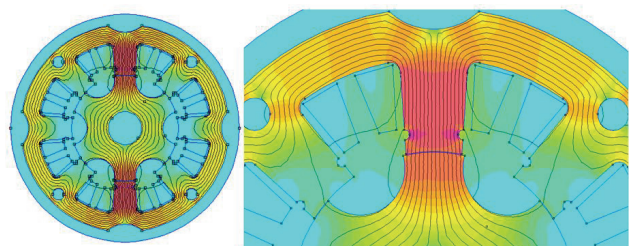


Рисунок 3 – Розподіл магнітного поля у зубцях ВІД при узгодженому положенні

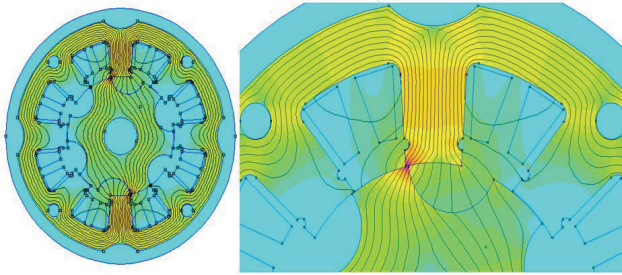


Рисунок 4 – Розподіл магнітного поля у зубцях ВІД при розузгодженому положенні

За допомогою підпрограми, написаної в текстовому файлі на мові Lua автоматизуємо процес розрахунку. Граничними областями при цьому є положення зубців статора і ротора – від неузгодженого до узгодженого положень, що складає $22,5^\circ$, а також допустимих значень МРС на рівні 40000А.

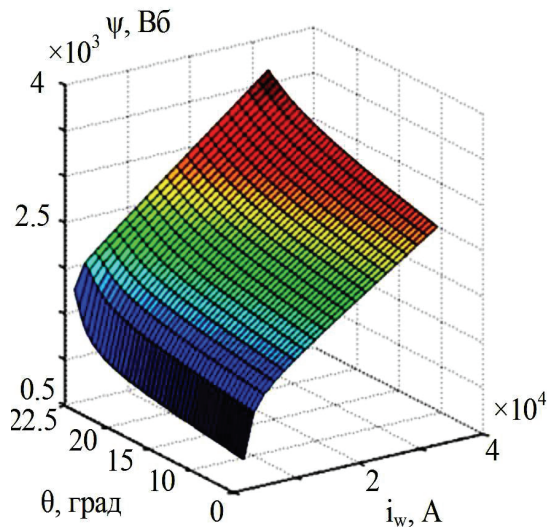


Рисунок 5 – Залежність потокозчеплення фази від МРС та кута повороту ротора

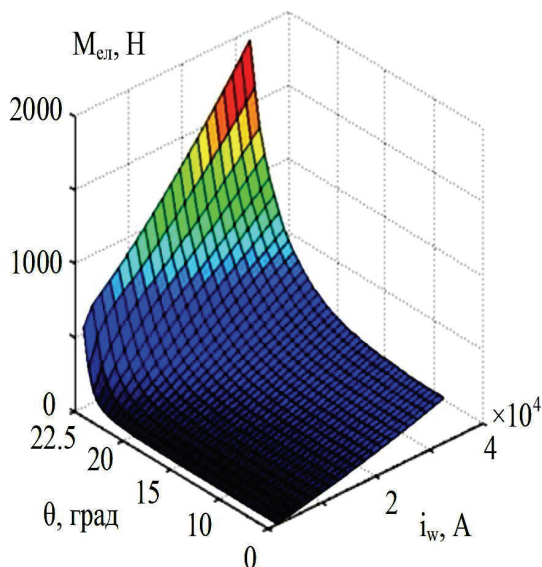


Рисунок 6 – Залежність електромагнітного моменту від МРС та кута повороту ротора

Результатом розрахунку є тривимірні поверхні, що показують залежність потокозчеплення фази та електромагнітного моменту від МРС та кута повороту ротора (рис. 5, 6).

Для отримання безперервних залежностей потокозчеплення результати цифрового моделювання пропонується апроксимувати безперервними функціями. При виборі типу функції вирішувалися наступні завдання:

- функція і її похідні по куту повороту ротора на початку і кінці інтервалу на якому проводиться апроксимація (полюсний розподіл ВІД) повинні бути однаковими;
- запропонована функція повинна враховувати зміни струмів не тільки власної, а й сусідніх фаз;
- запропонована функція повинна мати досить простий вигляд аналітичних частинних похідних по всіх координатах.

Для визначення коефіцієнтів полінома пропонується використовувати метод на основі поліномів Чебишева.

Зниження порядку математичної моделі без обмеження можливо отримати, якщо визначити момент за результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів за допомогою програми FEMM.

Використовуючи раніш отриману систему рівнянь (1), складаємо структурну схему чотирифазного ВІД, що наведена на рис. 7.

Невід'ємною складовою вентиляно-індукторного приводу (ВІП) є ЕК. ЕК у ВІП необхідний для підключення фаз двигуна до джерела живлення в залежності від сигналу датчика положення ротора. Так як робота ВІД не залежить від напрямку струму в фазі, то для комутації струму в ній зазвичай застосовується півмостова (однапівперіодна) схема. При цьому на кожен фазу необхідно два ключа і два зворотних діода. Таким чином, число силових елементів зростає пропорційно числу фаз. Для живлення чотирифазного ВІД схема ЕК представлена на рис. 8.

При моделюванні ЕК були використані технічні характеристики IGBT-транзистора MIO1800-17E10 та діода Д143-1000-18-УХЛ2. Їх моделювання зводиться до опису двох стійких станів: відкритого і закритого. У відкритому стані транзистор знаходиться в режимі насичення і характеризується активним опором прямого каналу. Закритий стан транзистора характеризується нескінченно великим опором каналу. У відкритому стані діод має падіння напруги на рівні 0,8-1,2В, а в закритому стані опір діода приймається рівним нескінченності. За допомогою ЕК реалізована одиночна симетрична комутація фаз з обмеженням струму на рівні 600А.

Використовуючи структуру (рис. 7), а також запропоновану схему ЕК було створено імітаційну модель у середовищі Matlab. У результаті моделювання отримані осцилограми прямого пуску, а саме струму двигуна (рис. 9), моменту (рис. 10), швидкості (рис. 11) з обмеженням струму на рівні 600 А.

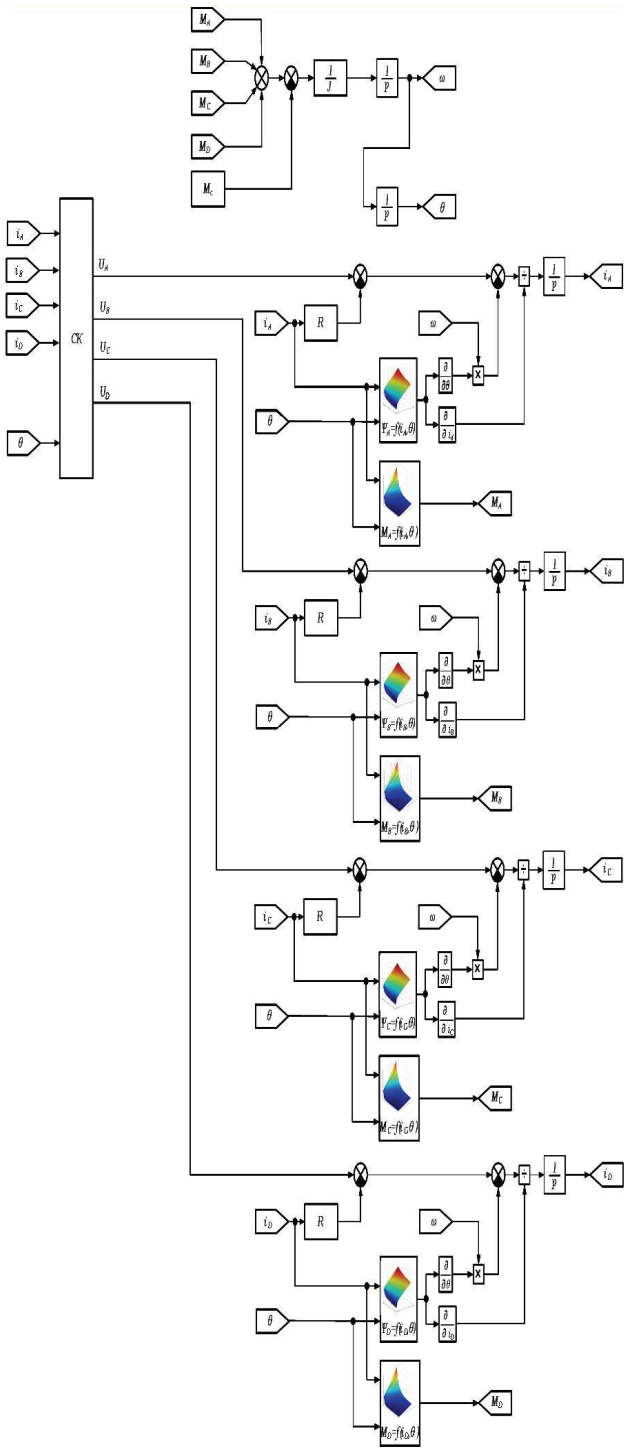


Рисунок 7 – Структурна схема ВІД

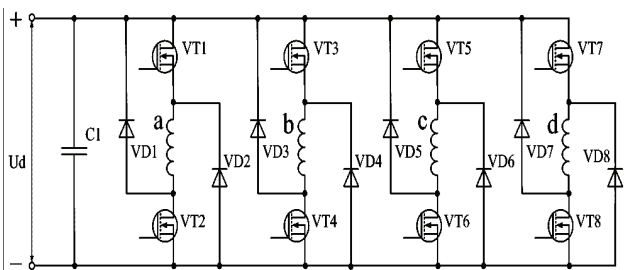


Рисунок 8 – Схема ЕК для 4-фазного ВІД

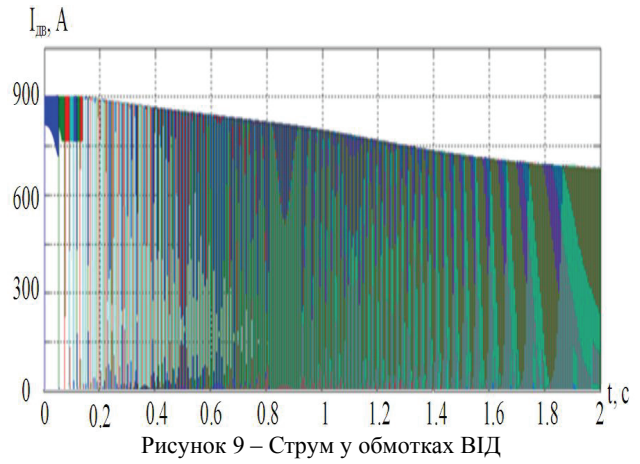


Рисунок 9 – Струм у обмотках ВІД

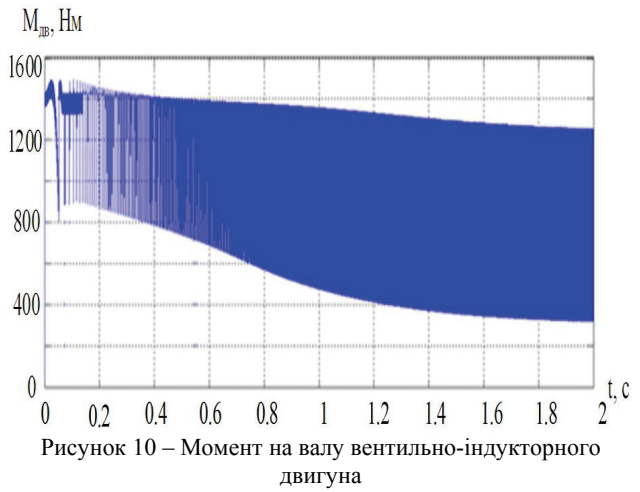


Рисунок 10 – Момент на валу вентильно-індукторного двигуна

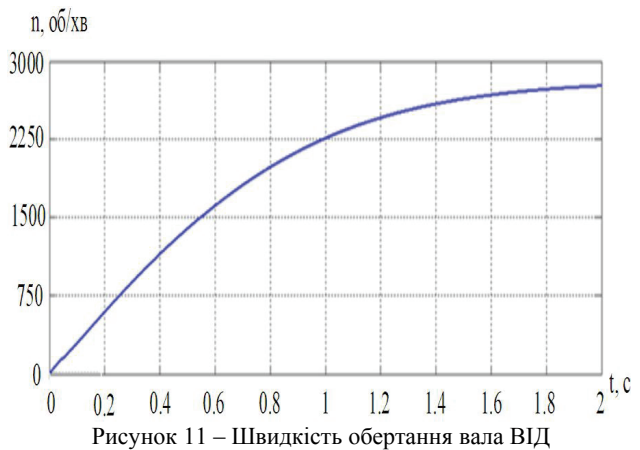


Рисунок 11 – Швидкість обертання вала ВІД

Висновки. Отримано результати у вигляді розподілу магнітного поля у двигуні, тривимірні графіки залежності потокозчеплення та електромагнітного моменту двигуна від кута повороту ротора. Дана математична модель є базовою для подальшого дослідження роботи ВІД та його застосування на маневровому тепловозі.

Список літератури

1. Krishnan R. Switched reluctance motor drives. Modeling. Simulation, Analysis, Design and Applications. CRC Press, 2001. 398 p.
2. Buriakovskiy S., Maslii A., Pasko O., Denys I. Research

and development of an electric traction drive based on a switched reluctance motor. *Transport Problems*. 2018. № 13/2. P. 69-80.

3. *Viorel I.A., Strete L., Husain I.* An analytical model of switched reluctance motor based on magnetic field analysis results. *Proc. of 3rd Int. Symp. on Electrical Engineering and Energy Converters*. Romania, 2009. P. 97-100.

4. *Martin MANA*: Mathematical model switched reluctance motor. Dept. of Power Electrical and Electronic Engineering. 2010. P. 25.

5. *Голландцев Ю.А.* Вентильные индукторно-реактивные двигатели. Санкт-Петербург: Издательство центрального научно-исследовательского института «Электроприбор», 2003. С. 147.

6. *Rasmussen P.* Omand Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors. Denmark: Aalborg University, 2002. 256 p.

7. *David M.* Finite Element Method Magnetics. User's Manual. 2004. Version 3.4. 79 p.

8. *Рымша В.В.* Моделирование и синтез реактивных и индукторных электромеханических преобразователей: дис. д-ра техн. наук: 05.09.01 / Одесса, 2004. 336 с.

9. *Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. Санкт-Петербург: КОРОНА-принт, 2007. 320 с.

10. *Маслий А.С.* Микропроцессорный вентильно-индукторный электропривод стрелочного перевода моношпального типа : дис. канд. техн. наук : 05.09.03 «Электротехнические системы и комплексы» / Харьков, 2014. 192 с.

11. *Balaji M., Kamaraj V.* Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm. *European Journal of Scientific Research*. Vol.47, No.2 (2010). P.187-196.

12. *Manesh Krishnamurty, Chris S Edrington, Ali Emadi, Peyman Asadi, Mehrdad Fahimi, Babak Fahimi* Making the Case for Application of Switched Reluctance Motor Technology in Automotive Product. *IEEE Transaction on Power Electronics*. May 2006. Vol. 21, No. 3. P. 659-675.

References (transliterated)

1. *Krishnan R.* Switched reluctance motor drives. Modeling. Simulation, Analysis, Design and Applications. CRC Press, 2001. 398 p.

2. *Buriakovskiy S., Maslii A., Pasko O., Denys I.* Research and development of an electric traction drive based on a switched reluctance motor. *Transport Problems*. 2018. № 13/2. P. 69-80.

3. *Viorel I.A., Strete L., Husain I.* An analytical model of switched reluctance motor based on magnetic field analysis results, *Proc. of 3rd Int. Symp. on Electrical Engineering and Energy Converters*. Romania. 2009. P. 97-100.

4. *Martin MANA*: Mathematical model switched reluctance motor. Dept. of Power Electrical and Electronic Engineering, 2010 P.25.

5. *Golladcev U.A.* Ventilno-inductornie dvigateli [Switched-reluctance motors], Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo central'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta «Electropribor», 2003. P. 147.

6. *Rasmussen P.* Omand Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors. Denmark: Aalborg University, 2002. 256 p.

7. *David M.* Finite Element Method Magnetics. User's Manual. 2004. Version 3.4 79 p.

8. *Rimsha V.V.* Modelirovanie i sintez reaktivnih i induktivnih electromechanicheskikh preobrazovatelei [Modeling and synthesis of reactive and inductive electromechanical converters]: dissertacia doktora tekhnicheskikh nauk, 05.09.01. Odessa, 2004. 320 p.

9. *German-Galkin S.G.* Computernoe modelirovanie poluprovodnikovih system [Computer simulation of semiconductor systems]. Sankt-Peterburg; Korona-print, 2007. 320 p.

10. *Masliy A.S.* Mikroprocesorniye ventilno-inductorniye elektroprivody strelonogo perevoda monoshpalnogo tipa [Microprocessor switched-reluctance electric switch of mono-sleeper type]: dissertacia, kandidat tekhnicheskikh nauk: 05.09.03 Elektricheskie sistemi i kompleksi. Kharkiv, 2014. 192 p.

11. *Balaji M., Kamaraj V.* Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm. *European Journal of Scientific Research*. Vol.47 No.2 (2010). P. 187-196.

12. *Manesh Krishnamurty, Chris S Edrington, Ali Emadi, Peyman Asadi, Mehrdad Fahimi, Babak Fahimi* Making the Case for Application of Switched Reluctance Motor Technology in Automotive Product. *IEEE Transaction on Power Electronics*. May 2006. Vol. 21, No. 3. P. 659-675.

Hadziyulna (received) 04.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Маслий Артем Сергійович (Маслий Артем Сергеевич, Masliy Artem Sergeevich) – кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна; e-mail: a.masliy@ukr.net.

Карпенко Надія Петрівна (Карпенко Надежда Петровна, Karpenko Nadezhda Petrovna) – кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна.

Туренко Олександр Геннадійович (Туренко Александр Геннадиевич, Turenko Alexandr Gennadievich) – студент Українського державного університету залізничного транспорту, кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна; e-mail: aleksandrturenko97@gmail.com

Сафронов Олег Едуардович (Сафронов Олег Эдуардович, Safronov Oleg Eduardovich) – студент Українського державного університету залізничного транспорту, кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна; e-mail: sfrnvolh@gmail.com

Головко Петро Анатолійович (Головко Петр Анатоліевич, Golovko Petr Anatolievich) – студент Українського державного університету залізничного транспорту, кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна.

УДК 621.371.344

В.В. ПІЛІНСЬКИЙ, О.С. РАТУШНИЙ, Д.В. ТІТКОВ**АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИСТРОЇВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ У ПРИМІЩЕННІ**

У статті досліджено електромагнітну обстановку в приміщенні офісу, де розташовано три прийнятно-передавальні Wi-Fi пристрої (IoT модулі, точки доступу, або маршрутизатори). Програмне середовище Tamograph Site Survey Evaluation, яким проведено дослідження, надає можливість створити довільну схему приміщення та розташувати у відповідному місці прийнятно-передавальні Wi-Fi пристрої (маршрутизатори (роутери), точки доступу, тощо) та змоделювати електромагнітну обстановку у різних режимах для різних налаштувань. Для дослідження обрано офіс з двома залами та іншими приміщеннями, обладнаними Wi-Fi маршрутизаторами, що працюють за стандартом 802.11n. Wi-Fi маршрутизатор обрано об'єктом дослідження, як компонент технології Інтернету речей, що з'єднані між собою та всесвітньою мережею безпроводовими засобами. Розповсюдженим способом з'єднання є технологія Wi-Fi, а маршрутизатори пристроями, що надають змогу керувати різними датчиками та іншими елементами, зокрема, «розумного дому». Дослідження проведено зі зміною параметрів маршрутизаторів, а саме зі зміною робочої частоти (зміна каналів). Наведено плани приміщення із рівнем сигналу, відношенням сигнал/завада за різних налаштувань. У результаті аналізу показано, що електромагнітною обстановкою можна керувати, налаштування апаратури може суттєво її покращити.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, EMC, електромагнітна обстановка, ЕМО, Wi-Fi маршрутизатор, Інтернет речей.

В.В. ПИЛИНСКИЙ, А.С. РАТУШНИЙ, Д.В. ТИТКОВ**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ УСТРОЙСТВ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ В ПОМЕЩЕНИИ**

В статье исследована электромагнитная обстановка у в помещении офиса, где расположены приемно-передающие Wi-Fi устройства (IoT модули, точки доступа, или маршрутизаторы). Исследование проведено в программной среде Tamograph Site Survey Evaluation, что дает возможность создать любую схему помещения и разместить в соответствующем месте приемно-передающие Wi-Fi устройства (маршрутизаторы (роутеры), точки доступа, т.п.) и смоделировать электромагнитную обстановку в различных режимах с изменениями настроек. Для исследования выбран офис с двумя залами и другими помещениями, оборудованными Wi-Fi маршрутизаторами, работающими по стандарту 802.11n. Wi-Fi маршрутизатор избран объектом исследования, как компонент, технологии, Интернета вещей, которые соединены между собой и всемирной сетью беспроводной способом. Распространенным способом соединения является технология Wi-Fi, а маршрутизатор предоставляют возможность управлять различными датчиками и другими элементами, в частности, умного дома. Исследование проведено с изменением параметров маршрутизаторов, а именно с изменением рабочей частоты (изменение каналов). Приведены планы помещения с уровнем сигнала, отношением сигнал / помеха при различных настройках. В результате анализа показано, что электромагнитной обстановкой можно управлять, изменение настроек аппаратуры может существенно ее улучшить.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, EMC, электромагнитная обстановка, ЕМО, Wi-Fi маршрутизатор, Интернет вещей.

V.V. PILINSKY, O.S. RATUSHNYI, D.V. TITKOV**ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT OF INTERNET OF THINGS DEVICES INDOORS**

The article investigates the electromagnetic environment in the office where the transceivers are located (three Wi-Fi routers). The Tamograph Site Survey Evaluation software environment allows you to create an arbitrary map or room layout and place the receiving and transmitting devices (routers, encoders, etc.) in the appropriate location and simulate the electromagnetic environment in different modes with, changes settings. For the study, an office with two rooms and other rooms equipped with Wi-Fi routers that operate on the 802.11n standard was selected. A Wi-Fi router is chosen as a research object as a component of technology, including the Internet of Things, which is connected to each other and to the World Wide Web. Wi-Fi technology is a common way of connecting, and routers are nowadays so-called smart devices that allow you to control different sensors and other elements, such as a smart home. The study was performed by changing the parameters of the routers, namely by changing the operating frequency, ie channels. Shows floor plans with signal level, signal / interference ratio for different settings. The result of the analysis showed that the electromagnetic environment can be controlled, it can be favorable after tuning various devices.

Keywords: electromagnetic compatibility, EMC, electromagnetic environment, EME, Wi-Fi router, Internet of things.

Постановка проблеми. Особливою ознакою сьогодення є безперервне експоненціальне зростання застосування електронного обладнання, більша частина

якого містить вбудовані перетворювачі енергії, генератори, передавачі, приймачі тощо. Це прилади для широкого спеціального та побутового користування і

пристрої, що безпосередньо впливають на розвиток технології Інтернету речей (Internet of Things–IoT [1]) та поступово змінюють звичне інформаційне середовище [2]. Зростання кількості пристроїв, оснований на передаванні-прийманні радіосигналів, суттєво ускладнило забезпечення їх працездатності, особливо з урахуванням впливу електромагнітних завад, що виникають під час роботи спільно та/або на відстані розташованих пристроїв. Звідси випливає, що подібні пристрої необхідно трактувати, як емітери неумисних електромагнітних завад і, як рецептори завад, тобто, є чутливими до зовнішнього впливу емісії від інших приладів з навколишнього середовища та за кондуктивними колами. Тобто розробник електричного або електронного обладнання має бути професійно обізнаним із вимогами та засадами забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) [3] на основі даних, наведених у технічних характеристиках. Вони пов'язані зі стандартами, перелік деяких наведено у [2], яким мають відповідати розроблені вироби. Інакше вироби не можливо поставляти на ринки країн Європейської співдружності [4]. Виконання вимог, стандартів, щодо забезпечення ЕМС та електробезпеки є обов'язковими – їх контролюють відповідні органи з сертифікації конкретного виду продукції.

Аналіз публікацій. У роботі [2] обґрунтовано особливості щодо забезпечення ЕМС внаслідок стрімкого зростання кількості безпроводових пристроїв. У цій роботі також наведено прогноз розвитку технології Інтернету речей. Вказано, що пристрої Інтернету речей з'єднують між собою безпроводників з використанням багатьох стандартів зв'язку, таких як Wi-Fi, Zigbee, LoRaWAN, NFC, Bluetooth та інші. У роботі [2] логічно показано хронологію створення стандартів щодо забезпечення електромагнітної сумісності та обґрунтовано необхідність їх постійного оновлення за координацією Міжнародної електротехнічної комісії з Регіональними та Національними структурами.

У роботі [5] наведено математичний спосіб оцінювання забезпечення електромагнітної сумісності.

Важливим етапом розв'язання задачі забезпечення ЕМС є прогнозування електромагнітної обстановки (ЕМО). З появою нових пристроїв, збільшують вимоги до оцінки ЕМО. Саме тому потрібно завжди розвивати дослідження у цій галузі.

Мета статті. Дослідити електромагнітну обстановку в офісному приміщенні, та довести можливість її покращення.

Налаштування програми. Дослідження виконано на основі програмного середовища Tamograph Site Survey Evaluation [6], яке дає змогу скласти будь-яку схему приміщення та розташувати у відповідному місці на схемі приймально-передавальні пристрої (маршрутизатори, датчики з Wi-Fi модулем, тощо) та змодельовати електромагнітну обстановку, це можна робити зміненням їх налаштування. Як об'єкт дослідження обрано офісне приміщення (рис. 1) [7]. Потрібно виконати відповідні налаштування.

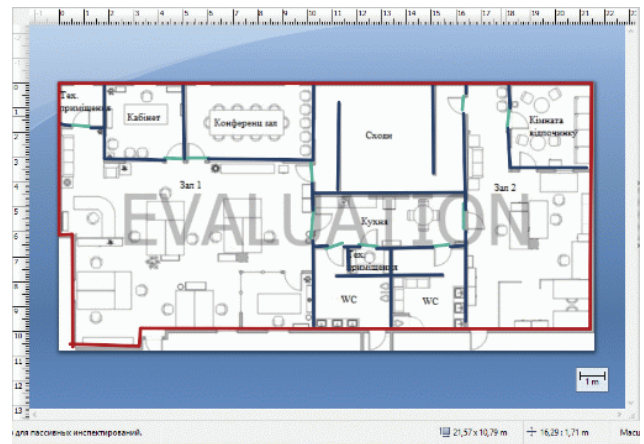


Рисунок 1 – План приміщення

Моделювання виконано для звичайного офісного приміщення, це тип ЕМО приміщення з суттєвим загасанням сигналу (рис. 2).

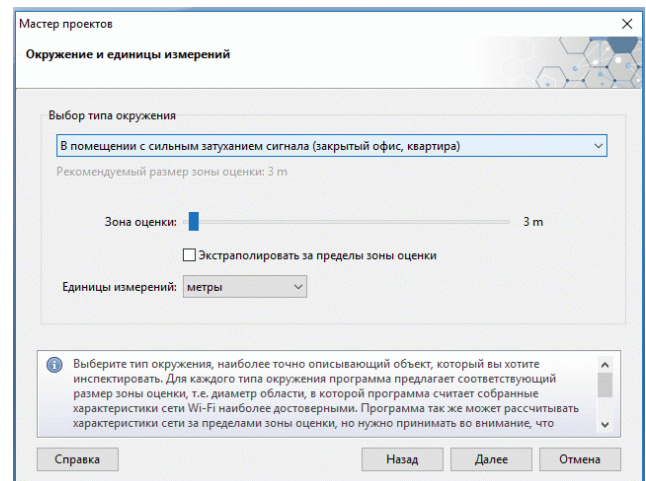


Рисунок 2 – Попередні налаштування програми

Для приміщення потрібно провести налаштування перешкод: стін, дверей.

Наступний етап – розташування Wi-Fi пристроїв у приміщенні. Місця для маршрутизаторів необхідно обрати так, щоб вони розповсюджували сигнал на усій площі офісу. Робочі частоти маршрутизаторів обрано у діапазонах 2,4 ГГц та 5 ГГц, відповідно до стандарту 802.11n [8]. Маршрутизатори розташовано у центрі зали 1, зали 2 та у кабінеті.

Моделювання електромагнітної обстановки. Після налаштування проведено моделювання за [6] рівня сигналу, результати показано на рис. 3 та для інших ситуацій у [9].

Кольорові позначення для рівня сигналу у програмі визначають за шкалою, яку наведено унизу кожного зображення екрану.

Розподіл сигналу на рис. 3 (червоний колір означає сигнал менший за -80 дБм, а синій – більше -20 дБм) можна зробити висновок, що трьох маршрутизаторів достатньо щоб покрити Wi-Fi сигналом увесь офіс.

Виконано аналіз приміщення щодо відношення сигнал-завада. Результат наведено на рис. 4.

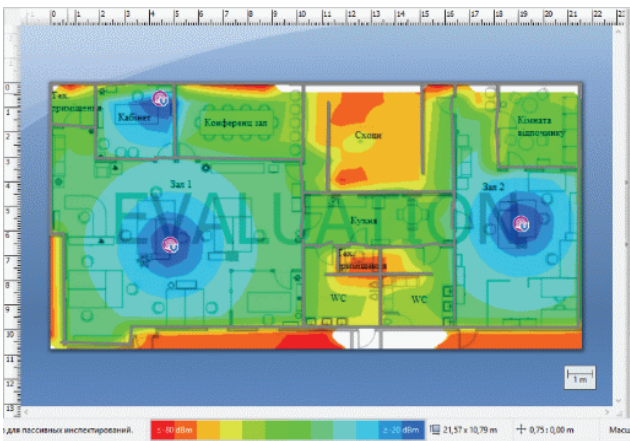


Рисунок 3 – Розподіл рівня сигналу

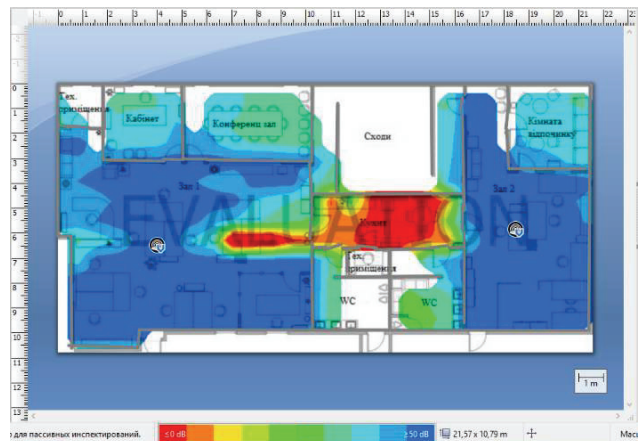


Рисунок 4 – Розподіл відношення сигнал-завада

Для відношення сигнал-завада червоний колір – менше 0 дБ, а синій – більше 50 дБ. Як впливає з рис. 4 ЕМО у приміщенні офісу сприйнятлива, тобто ЕМС майже забезпечено. Проте на кухні маршрутизатори заважають один одному – рівень завад у цій зоні більший. Це можна пояснити тим, що для маршрути-

заторів, які працюють у діапазоні частот 5 ГГц за стандартом 802.11n, стандартними налаштуваннями визначено діапазон каналів 36-40 з близькими частотами (рис. 5, а). Змінимо діапазон каналів на одному із маршрутизаторів на 100-104, як показано на рис. 5, б.

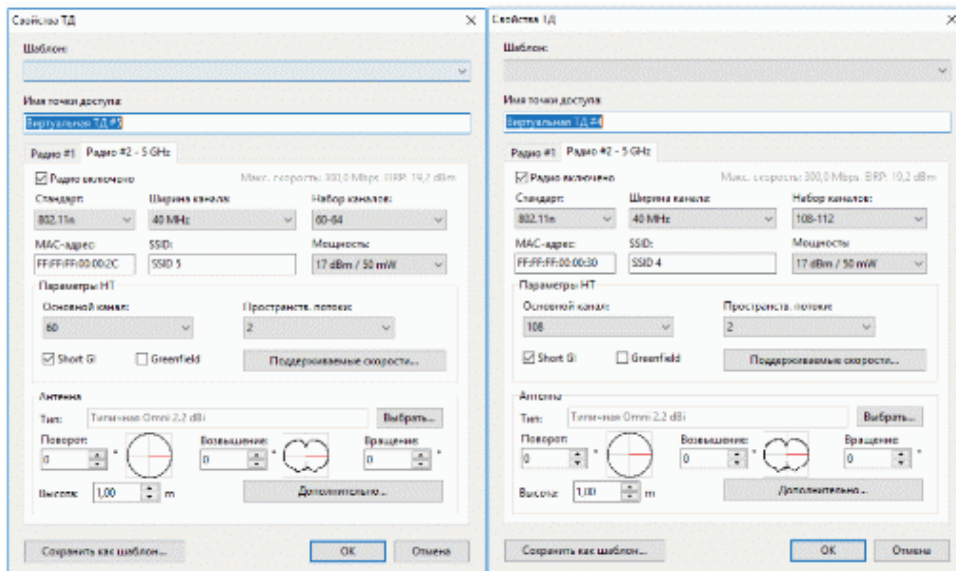


Рисунок 5 – Налаштування роутера: а – стандартні, б – змінені

Результати моделювання наведено на рис. 6.

Після зміни діапазону каналів на другому маршрутизаторі маршрутизатори не заважають один одному (рис. 6). Це пов'язано з тим, що після проведення налаштувань вони працюють у різних частотних діапазонах.

За стандартом 802.11 маршрутизатори можуть працювати також у діапазоні 2,4 ГГц. Тому проведено дослідження для сигналу від трьох маршрутизаторів, що працюють у діапазоні 2,4 ГГц. Результат моделювання рівня сигналу від трьох маршрутизаторів за стандартними налаштуваннями наведено на рис. 7, а. Результат моделювання відношення сигнал-завада наведено на рис. 7. У порівнянні з маршрутизаторами, що працюють на частоті 5 ГГц, ці маршрутизатори мають краще поширення сигналу, але й створюють

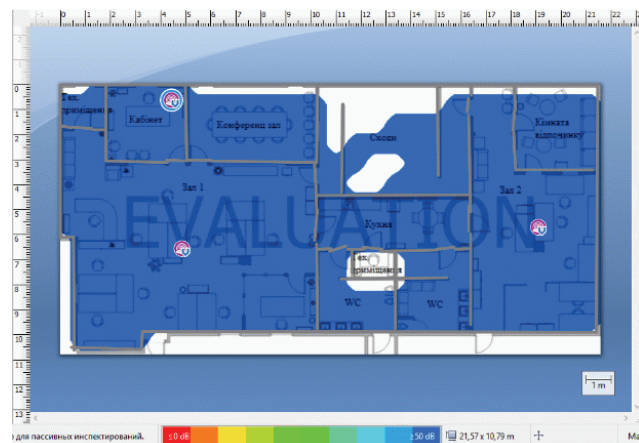


Рисунок 6 – Рівень відношення сигналу до завади після зміни каналів на маршрутизаторах

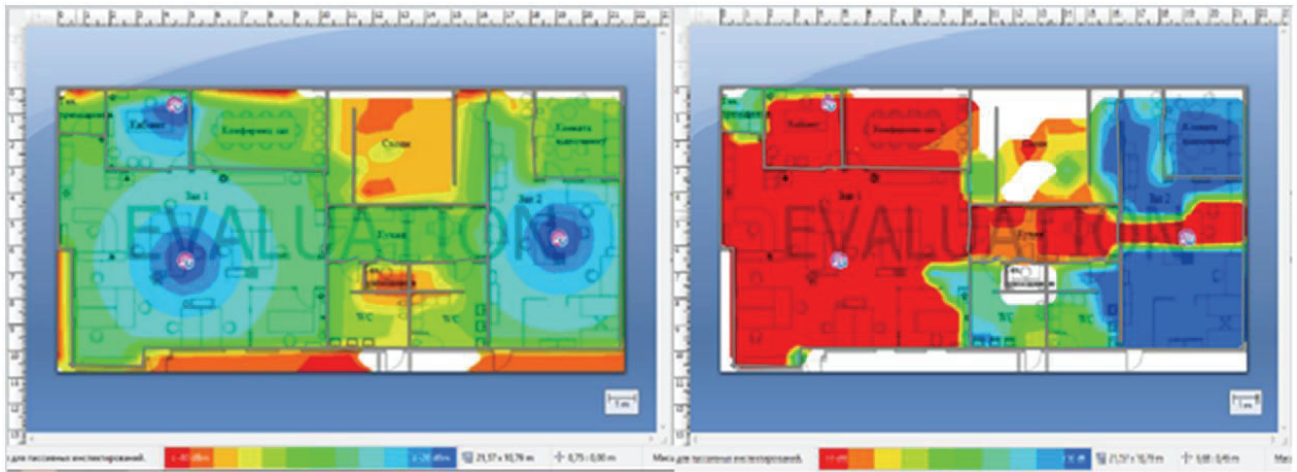


Рисунок 7 – Моделювання: *a* – рівня сигналу; *б* – відношення сигнал-завада

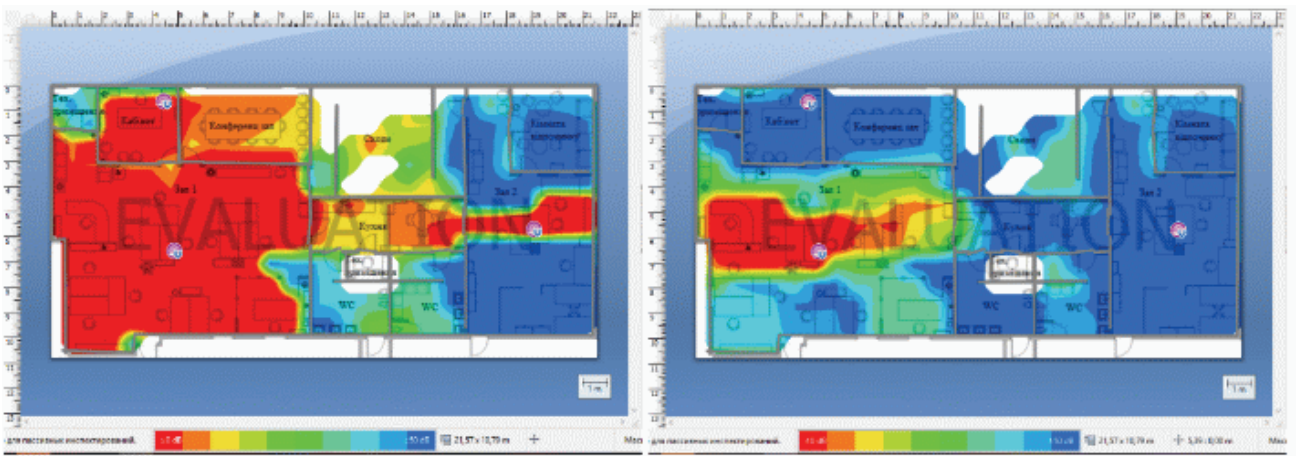


Рисунок 8 – Результат моделювання: *a* – на 4-ому каналі; *б* – на 6-ому каналі

завади більшого рівня. За стандартними налаштуваннями маршрутизатори на частоті 2,4 ГГц працюють у 1-ому каналі. Змінимо на маршрутизаторі у залі 1 канал на четвертий.

Як результат ЕМО в офісі майже не змінилась. Замінімо канали на тому ж маршрутизаторі спочатку на 4-ий потім на 6-ий рис. 8.

ЕМО покращено після того, як канал маршрутизатора змінено на 6-ий. Це пов'язано з тим що за стандартом 802.11n канали розбивають за частотами, що показано на рис. 9.

1	2.401	2.412	2.423
2	2.406	2.417	2.428
3	2.411	2.422	2.433
4	2.416	2.427	2.438
5	2.421	2.432	2.443
6	2.426	2.437	2.448
7	2.431	2.442	2.453
8	2.436	2.447	2.458
9	2.441	2.452	2.463
10	2.446	2.457	2.468
11	2.451	2.462	2.473
12	2.456	2.467	2.478
13	2.461	2.472	2.483

Рисунок 9 – Частотний план за стандартом 802.11n

Отже заміненнями каналів, наприклад: налаштуємо другий маршрутизатор на 7 канал, а третій на 12. У результаті стан електромагнітної обстановки у офісі суттєво змінено на більш сприйнятливий.

Можна зробити висновок, що у діапазоні 2,4 ГГц змінення каналів така ж ефективна як і у діапазоні 5 ГГц. Лише треба враховувати відповідний частотний план і переналаштовувати канали за ним.

За необхідності аналізу ЕМО у кондуктивних колах доцільно застосувати інформацію, наведену у роботі [10], де запропоновано рекомендації та засоби зменшення електромагнітних завад у колах електроживлення. Конкретну методику обрання мережевих протизавадних фільтрів на основі баз даних відомих провідних фірм розробників фільтрів наведено у роботі [11].

Висновки

1. Досліджено електромагнітну обстановку у офісі, в якому розташовано 3 Wi-Fi маршрутизатори, що працюють у діапазонах частот 2,4 ГГц та 5 ГГц. За раціональної зміни каналів на маршрутизаторах, електромагнітну сумісність гарантовано забезпечено.

2. Обґрунтовано, яким чином на прикладі діапазону 2,4 ГГц, раціонально змінювати канали задля

формування сприйнятливої ЕМО.

3. Показано, що для покращення ЕМО необхідно скласти частотний план, за яким налаштувати усі маршрутизатори у приміщенні, що забезпечить позитивний результат навіть за умови дуже щільного розташування обладнання.

Список літератури

1. *Kia Wiklundh, Peter Stenumgaard* EMC Challenges for the Internet of Things. EMC EUROPE 2017, Angers, France, September 4-8, 2017.

2. *Рентюк В.* Электромагнитная совместимость: проблема, от которой не уйти. Компоненты и технологии. 2017. № 7. С. 4-5

3. ДСТУ ІЕС 60050-161. Словник електротехнічних термінів. Электромагнітна сумісність. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 60 с.

4. Directive 2014/30/EU of 26 February 2014 on the harmonization of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility (recast)(in short referred to as «the EMC Directive»).

5. *Козирацький Ю.Л., Иванцов А.В., Мамаджян Е.А.* Метод оперативной оценки радиоэлектронной обстановки в интересах обеспечения скрытности и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Журнал сибирского федерального университета «Инженерия та технології». 2018. № 11(3). С. 256-262.

6. Офіційний сайт розробника Tamograph Site Survey. URL: <https://www.tamos.ru/products/wifi-site-survey/> (дата звернення 05.06.2019).

7. <https://elvnxfint.appspot.com/shema-planirovki-ofisa.html/> (дата звернення 05.06.2019).

8. IEEE 802.11-2016 - IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.

9. *Ратушний О.С.* Особливості забезпечення електромагнітної сумісності пристроїв Інтернету речей: дипломна робота рівня бакалавр. Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ: 2019. 63 с.

10. *Векслер Г.С., Недочетов В.С., Пилинський В.В.* и др. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания. Киев: Техника, 1990. 167 с.

11. *Пілінський В.В., Тітков Д.В., Ратушний О.С.* Effective approach to the selection of mains radio frequency interference filters. Электромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2018. № 15. С. 27-30.

References (transliterated)

1. *Kia Wiklundh, Peter Stenumgaard* EMC Challenges for the Internet of Things. EMC EUROPE 2017, Angers, France, September 4-8, 2017.

2. *Rentyuk V.* Elektromagnitnaya sovmestimost: problema, ot kotoroj ne uiti. Komponenty i tehnologii 2017. № 7. S. 4-5

3. DSTU IEC 60050-161. Slovník elektrotechnických terminů. Elektromagnitna sumisnist. Kyiv: Derzspozhyvstandart Ukrainy. 2005. 60 s.

4. Directive 2014/30/EU of 26 February 2014 on the harmonization of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility (recast)(in short referred to as «the EMC Directive»).

5. *Koziratskiy Yu.L., Ivantsov A.V., Mamadzhanyan E.A.* Metod operativnoy otsenki radioelektronnoy obstanovki v interesah obespecheniya skryitnosti i elektromagnitnoy sovmestimosti radioelektronnykh sredstv. Zhurnal sibirskogo federalnogo universitetu «Inzheneriya ta tehnologiyi». 2018. № 11(3). P. 256-262.

6. Ofitsijnij sayt rozrobnika Tamograph Site Survey. URL: <https://www.tamos.ru/products/wifi-site-survey/> (access date 05.06.2019).

7. <https://elvnxfint.appspot.com/shema-planirovki-ofisa.html/> / access date 05.06.2019).

8. IEEE 802.11-2016 - IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.

9. *Ratushny O.S.* Osoblivosti zabezpechennya elektromagnitnoyi sumisnosti pristroyiv Internetu rechet: diplomna robota rivnya bakalavr Natsionalnogo tehnicnogo universitetu Ukraini «Kiyivskiy politehnicnij institut imeni Igorya Sikorskogo». Kyiv: 2019. 63 p.

10. *Veksler G.S., Nedochetov V.S., Pilynskiy V.V.* i dr. Podavlenie elektromagnitnykh pomeh v tsepyah elektropitaniya. Kiyiv: Tehnika, 1990. 167 p.

11. *Pillinskiy V.V., Titkov D.V., Ratushny O.S.* Effective approach to the selection of mains radio frequency interference filters. Elektromagnitna sumisnist ta bezpeka na zaliznichnomu transporti. 2018. № 15. P. 27-30.

Надійшла (received) 22.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пілінський Володимир Володимирович (Пилинский Владимир Владимирович, Pilinsky Vladimir Vladimirovich) – кандидат технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна; ORCID:0000-0002-2569-9503, тел.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net

Ратушний Олексій Сергійович (Ратушний Алексей Сергеевич, Ratushnyi Oleksii Serhiiovych) – бакалавр, студент Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна; тел.: (066)-879-28-43; e-mail: ratushny.aleksey@gmail.com

Тітков Дмитро Валерійович (Титков Дмитрий Валериевич, Titkov Dmitro Valeriiovych) – асистент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-7491-6754; e-mail: titkov@ukr.net

УДК 621.316.99

С.С. РУДЕНКО, Д.Г. КОЛУШКО, О.Є. ІСТОМІН

РОЗРАХУНОК ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ «LIGRO»

Заземлювальний пристрій діючих електроустановок напругою понад 1 кВ представляє собою складну технічну систему, з розгалуженою сіткою горизонтальних та вертикальних заземлювачів. Моделювання аварійних режимів роботи для визначення його працездатності виконується при реальному струмі короткого замикання й дозволяє визначити значення його нормованих параметрів. Метою роботи є розробка тестової версії програмного комплексу для визначення нормованих параметрів заземлювального пристрою. У статті наведено алгоритм роботи розрахункової частини програмного комплексу та зроблено порівняльний аналіз з існуючими світовими аналогами. Було порівняно отримані експериментальним шляхом значення опору заземлювального пристрою з отриманими розрахунковим способом за допомогою двошарової моделі програмного комплексу «Grounding 1.0» та за допомогою створеного комплексу «LiGro» для вибірки з 70 підстанцій.

Ключові слова: електробезпека, заземлювальний пристрій, напруга дотику, коротке замикання, моделювання, програмний комплекс.

С.С. РУДЕНКО, Д.Г. КОЛУШКО, А.Е. ІСТОМІН

РАСЧЕТ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «LIGRO»

Заземляющего устройства действующих электроустановок напряжением выше 1 кВ представляет собой сложную техническую систему, с разветвленной сетью горизонтальных и вертикальных заземлителей. Моделирование аварийных режимов работы для определения его работоспособности выполняется при реальном токе короткого замыкания и позволяет определить значение его нормируемых параметров. Целью работы является разработка тестовой версии программного комплекса для определения нормируемых параметров заземляющего устройства. В статье приведен алгоритм работы расчетной части программного комплекса и сделан сравнительный анализ с существующими мировыми аналогами. Было выполнено сравнение полученных экспериментальным путем значений сопротивления заземляющего устройства с полученным расчетным способом с помощью двухслойной модели программного комплекса «Grounding 1.0» и с помощью созданного комплекса «LiGro» для выборки из 70 подстанций.

Ключевые слова: электробезопасность, заземляющее устройства, напряжение прикосновения, короткое замыкание, моделирование, программный комплекс

S.S. RUDENKO, D.G. KOLIUSHKO, A.E. ISTOMIN

CALCULATION OF GROUNDING DEVICES USING THE "LIGRO" SOFTWARE COMPLEX

The grounding device of existing electrical installations with voltages above 1 kV is a complex technical system with an extensive grid of horizontal and vertical grounding conductors. Modeling of emergency operation modes to determine its operability is performed with a real short circuit current and allows you to determine the value of its normalized parameters. The purpose of the work is to develop a test version of the software package for determining the normalized parameters of the grounding device. The article presents the algorithm of the calculation part of the software package and makes a comparative analysis with existing world analogues. The experimental values of the resistance of the grounding device were compared with the calculated method using a two-layer model of the Grounding 1.0 software package and using the created "LiGro" complex for a sample of 70 substations.

Key words: electrical safety, grounding devices, touch voltage, short circuit, modeling, software package

Постановка проблеми. Безпечна експлуатація й нормальна робота енергетичних об'єктів (електричних станцій та підстанцій, промислових підприємств тощо) у значній мірі визначаються працездатністю заземлювального пристрою (ЗП). В якості її оцінки використовують нормовані параметри (НП), що періодично контролюються протягом всього строку експлуатації електроустановки. До них відносять: опір ЗП, напругу на ЗП та напругу дотику. На ці величини впливають наступні фактори: конструктивне виконання ЗП, електрофізичні характеристики ґрунту та власні характеристики енергооб'єкту.

ЗП діючих високовольтних енергооб'єктів пред-

ставляє собою складну технічну систему, з розгалуженою сіткою горизонтальних та вертикальних заземлювачів, та розташовану на глибині, як правило, не менше 0,5 м. Моделювання аварійних режимів роботи для визначення його працездатності виконується при реальному струмі короткого замикання (КЗ) й дозволяє визначити значення НП навіть для тих об'єктів, які розташовані в стислій забудові або на території промислових підприємств.

Проте існуючі спеціальні розрахункові програми для моделювання режимів короткого замикання не враховують низку факторів, які впливають на точність визначення нормованих параметрів. Недостатня точ-

ність при визначенні НП може призвести до виходу із ладу дороговартісного обладнання, становити загрозу для безпеки обслуговуючого персоналу або ж призвести до значного завищення вартості ремонтно-відновлювальних робіт. Крім того, на електричних станціях та підстанціях України спостерігається активний перехід з релейно-контактної на мікропроцесорну техніку в системі релейного захисту, що ставить ще більш жорсткі умови до якості контролю працездатності заземлювальних пристроїв.

Метою роботи є розробка тестової версії програмного комплексу для визначення НП ЗП.

Матеріали дослідження. Новітній програмний комплекс для підвищення точності розрахунку НП запропоновано розробити на базі отриманих в [1] виразів для розрахунку потенціалу електричного поля нееквіпотенційного ЗП. Вказаний комплекс створюється з метою визначення НП ЗП при імітації однофазного замикання на землю (КЗ) на будь-яку одиницю обладнання підстанції.

Розрахунок НП ЗП можна поділити на три етапи:

- визначення реальної геоелектричної структури ґрунту та приведення її до виду еквівалентної розрахункової тришарової моделі за допомогою вбудованих в комплекс програм «VEZ-4A» та «EQ_MultiLayer» відповідно;

- розрахунок експерименту для оцінки адекватності побудованої моделі ЗП реальному ЗП за методикою наведеною в [2, 3];

- розрахунок НП ЗП в режимі КЗ.

Останні два етапи повинні мати однаковий алгоритм розрахунку й відрізняються лише вихідними даними розрахунку. З урахуванням відповідних доповнень до розробленого в [3] розрахункового алгоритму (див. рис. 1) роботи Grounding 1.0, в програмному середовищі Delphi було розроблено програмний комплекс "LiGro". На рис. 2 наведено інтерфейс розробленого комплексу з відкритим вікном запуску режиму моделювання режимів КЗ.

Від існуючих світових аналогів [4–12] для визначення НП ЗП діючих електричних станцій та підстанцій при розташуванні ЗП в тришаровому ґрунті вказаний програмний комплекс відрізняє:

- розрахунок електричного поля в комплексі відбувається на основі аналітичного рішення задачі про потенціал електричного поля точкового джерела струму у тришаровому напівпросторі;

- можливість довільної орієнтації заземлювача у просторі;

- врахування нееквіпотенційності заземлювачів;

- збереження тривалості розрахунку на рівні двошарових моделей.

Комплекс «LiGro» має широкі можливості та дозволяє:

- задати в будь-якому вузлі його індивідуальні властивості (клас напруги, місце КЗ, точки дотику, місце обслуговування, точки виміру експерименту, нейтраль з заданням струму в нейтралі для кожного

класу напруги, опір основи, початковий струм у вузлі);

- побудувати в масштабі заземлювальний пристрій з довільною конфігурацією (напрямки розміщення заземлювачів та їх переріз);

- проводити як групову, так і індивідуальну редакцію властивостей (координати, параметри і т.д.) об'єктів (вузлів та зв'язків);

- копіювати окремі елементи ЗП, створювати палітри стандартних елементів, автоматично будувати заземлювальні сітки з заданими параметрами, виконувати швидку навігацію схемою;

- визначити значення потенціалу електричного поля в кожному вузлі та струму в кожному заземлювачі (зв'язку);

- розрахувати експеримент для оцінки адекватності математичної моделі реальному ЗП як для всього ВРП, так і для окремих одиниць обладнання;

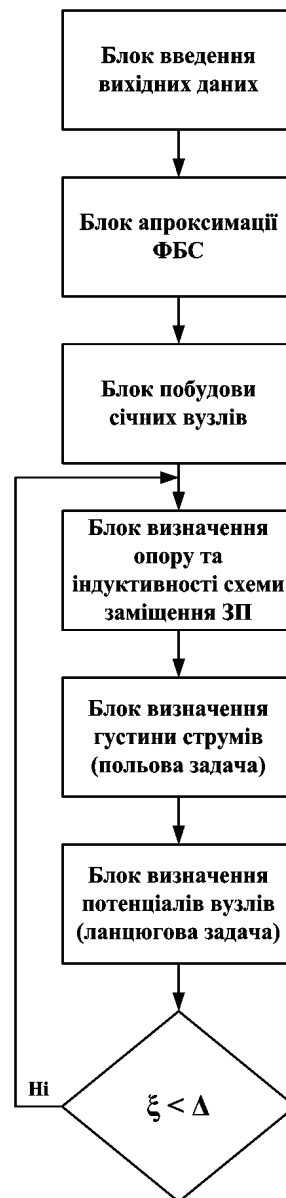


Рисунок 1 – Алгоритм роботи розрахункової частини програмного комплексу «LiGro»

– визначити значення потенціалу електричного поля в кожному вузлі та струму в кожному заземлювачі (зв'язку);

– розрахувати експеримент для оцінки адекватності математичної моделі реальному ЗП як для всього ВРП, так і для окремих одиниць обладнання;

– визначити напругу дотику, напругу на ЗП та опір ЗП на буд-якій з одиниці обладнання в будь-якому режимі однофазного КЗ на землю з урахуванням струму в заземлених нейтралях трансформаторів та наявності додаткових гальванічних зв'язків (трубопроводів, кабелів, порталів);

– проводити паралельний розрахунок експерименту, режимів КЗ та аналіз результатів розрахунку (завдяки розподілу цих напрямків на окремі потоки);

– можливість автоматичної побудови січних вузлів для врахування перетину заземлювачами границь поділу між шарами.

Слід зазначити, що виведення значення напруги в вузлах допомагає визначити місця прокладання додаткових заземлювачів для вирівнювання потенціалу на поверхні ґрунту та зменшення напруги дотику.

Оцінка адекватності розробленої моделі та створеного програмного комплексу проводилася шляхом порівняння результатів експериментальних досліджень для діючих високовольтних енергооб'єктів України з результатами розрахунку. При цьому значення експериментально визначеного опору ЗП та розрахованого за допомогою програмного комплексу «LiGro».

Для виконання вказаних досліджень була використана база даних з результатів ЕМД стану ЗП для 70

електричних підстанцій класом напруги 35 кВ, розташованих на півночі України. Вибір саме цих енергооб'єктів пояснюється наступним чином:

– підстанції, як правило, розташовані на відкритій місцевості й не мають гальванічного зв'язку з промисловими об'єктами (це забезпечує точність вимірювань);

– ґрунти місцевості, де розташовані об'єкти мають широкий діапазон значень питомого опору та їх співвідношення й дозволяють оцінити всі типи ґрунтів (наприклад, мінімальне й максимальне значення питомого опору першого шару лежить в діапазоні від 17 Ом·м до 5690 Ом·м);

– відсутність підземних комунікацій дозволила отримати криві ВЕЗ високої якості;

– всі виміри на кожній з підстанцій автор проводив особисто;

– всі підстанції входять до складу одного об'єкта.

При виконанні досліджень було порівняно отримані експериментальним шляхом значення $R_{ЗП}$ з отриманими розрахунковим способом за допомогою двошарової моделі програмного комплексу «Grounding 1.0» [4, 12] та за допомогою створеного програмного комплексу «LiGro» вибірку для 70 підстанцій результатів вимірів $R_{ЗП}$, розрахунку двошаровою $R_{ЗП2}$ та $R_{ЗП3}$ тришаровою моделлю відповідно, а також електрофізичні характеристики ґрунту, отримані при проведенні ВЕЗ ґрунту. Для наочності аналогічні дані для перших п'яти підстанцій наведено в табл. 1.

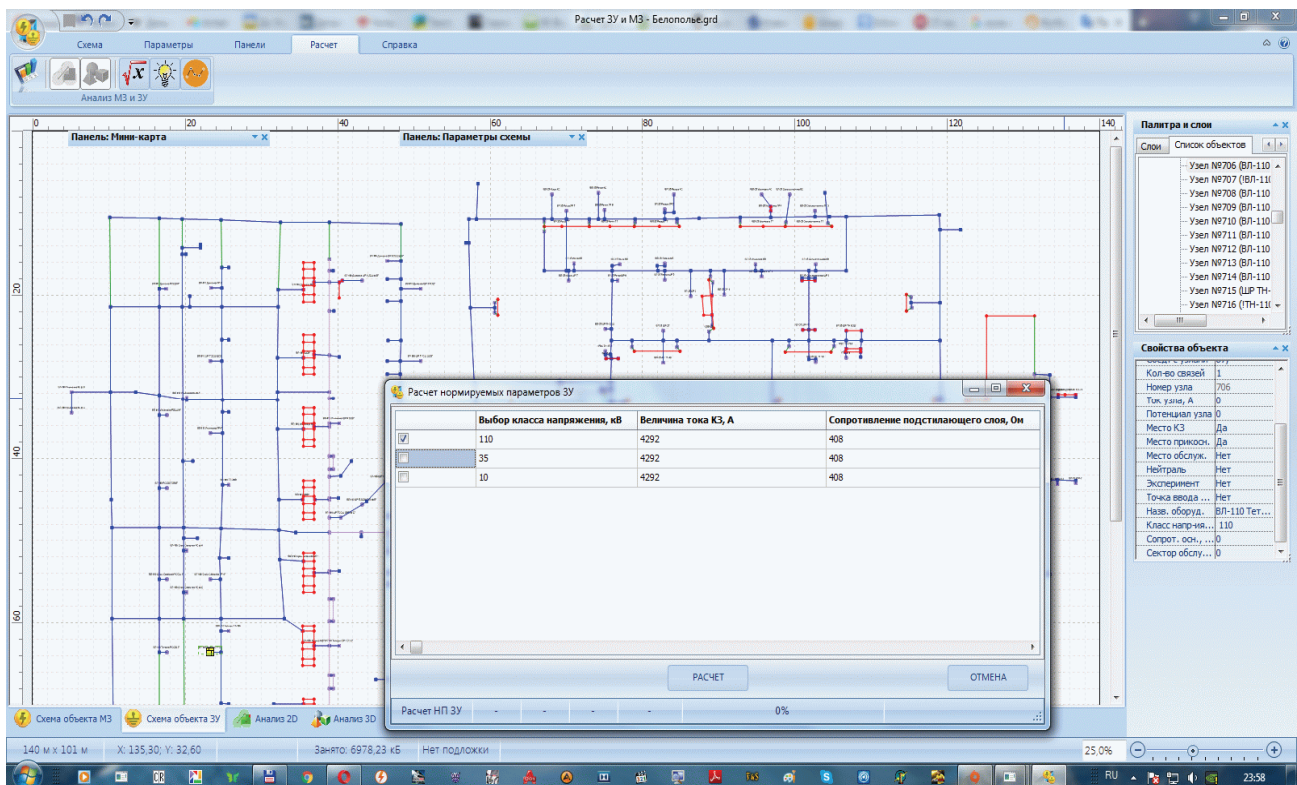


Рисунок 2 – Інтерфейс програмного комплексу «LiGro»

Таблиця 1 – Результати експериментального та розрахункового визначення опору ЗП для перших п'яти підстанцій

ПС	$R_{ЗП\epsilon}$, Ом	$R_{ЗП2}$, Ом	$R_{ЗП3}$, Ом	ρ_1 , Ом·м	ρ_2 , Ом·м	ρ_3 , Ом·м	h_1 , м	h_2 , м	ПС	$R_{ЗП\epsilon}$, Ом	$R_{ЗП2}$, Ом	$R_{ЗП3}$, Ом	ρ_1 , Ом·м	ρ_2 , Ом·м	ρ_3 , Ом·м	h_1 , м	h_2 , м
1	0,62	0,5953	0,6440	53,0	28,0	15,0	1,9	9,2	36	5,60	6,1330	5,5270	910,0	260	164	0,4	2,0
2	0,70	0,7490	0,7349	44,0	28,0	50,0	1,4	13,2	37	1,17	1,2360	1,3460	195,0	44,0	75,0	0,9	2,6
3	1,27	2,0840	1,5300	160,0	49,0	190,0	0,4	8,9	38	1,00	0,7290	0,7705	35,0	60,0	30,0	0,2	0,7
4	0,75	0,7149	0,6840	68,0	36,0	14,0	0,7	10,7	39	0,62	0,5410	0,6840	22,5	50,0	19,0	0,2	9,2
5	0,60	0,5419	0,6788	69,0	12,5	60,3	1,1	9,0	40	1,00	0,8850	0,9040	49,0	63,0	24,0	0,7	6,5
6	0,99	0,9278	0,9138	55,0	43,5	23,0	0,6	6,9	41	1,15	1,2500	1,2270	108,0	50,0	24,0	0,9	4,9
7	0,96	1,1520	1,2520	73,0	30,0	61,0	2,0	9,0	42	9,70	9,0000	8,3720	1150	20,0	900,0	1,4	3,2
8	1,16	1,3040	1,2180	166,5	38,0	90,0	0,5	6,1	43	1,33	2,4280	1,4670	320,0	27,0	250,0	0,4	5,0
9	0,81	0,9386	0,9175	72,8	22,0	34,4	1,2	5,5	44	2,60	2,9180	2,6620	47,0	800,0	250,0	2,4	4,1
10	1,06	1,6070	1,3960	210,0	72,0	60,0	0,3	1,0	45	0,99	0,8840	0,8390	44,0	26,6	71,0	2,1	15,4
11	1,12	1,2440	1,2060	550,0	36,0	46,0	0,4	4,2	46	0,90	1,2900	0,9520	49,8	19,0	220,0	1,9	15,9
12	0,39	0,6461	0,6448	60,0	12,0	20,0	3,5	11,0	47	1,79	1,8620	1,7920	195,0	60,0	125,0	0,5	7,5
13	2,37	2,3180	2,4650	610,0	31,0	115,0	0,6	1,5	48	1,25	1,7960	1,4910	73,0	28,0	139,5	1,2	3,8
14	0,96	0,5622	0,7640	17,0	49,5	21,0	0,2	4,7	49	0,50	0,5230	0,5225	54,0	64,0	18,0	0,2	1,9
15	0,88	1,0240	1,1110	50,0	21,0	46,5	1,8	4,9	50	2,00	2,5260	2,5240	120,0	47,0	210,0	0,8	1,5
16	0,87	0,4934	0,7422	34,0	2,0	2000	1,1	5,5	51	0,53	0,7412	0,8197	74,0	26,2	52,0	1,1	3,1
17	0,61	0,5522	0,5600	42,7	20,0	34,0	1,8	12,8	52	0,67	0,8287	0,9077	65,0	35,4	140,0	0,6	16,8
18	0,87	0,7781	0,8280	79,0	35,0	30,0	1,3	4,3	53	0,56	0,5375	0,5917	25,0	42,0	14,0	0,1	12,1
19	0,78	0,8820	0,8490	41,0	59,0	33,5	0,3	2,0	54	0,76	0,8873	0,8980	49,0	17,6	39,0	1,0	17,0
20	0,60	0,6185	0,6017	27,0	41,0	15,0	1,3	12,8	55	1,10	0,8556	0,9265	159,1	21,0	55,0	1,8	26,9
21	7,20	8,2160	7,5430	1250	1770	130,0	0,4	1,4	56	0,95	1,5750	1,0320	350,0	45,0	77,0	0,4	4,0
22	1,20	1,4590	1,3160	95,0	55,0	35,0	0,4	11,0	57	0,63	0,6615	0,6300	48,0	23,0	79,0	1,5	15,5
23	0,84	1,5790	0,9610	980,0	100,0	30,0	0,6	3,2	58	0,44	0,5143	0,4982	56,6	18,0	20,0	2,9	12,8
24	1,09	1,3980	1,2330	101,4	160,0	30,0	0,9	5,5	59	0,53	0,5849	0,6400	95,0	35,0	14,2	0,8	12,0
25	0,79	0,7408	0,7919	33,0	58,0	21,0	0,1	11,4	60	10,1	9,5910	10,100	4400	765,0	101,0	0,8	5,3
26	0,71	0,6598	0,5931	82,0	31,5	13,0	0,4	7,4	61	3,81	3,9690	3,8020	950,0	240,0	80,0	0,3	17,3
27	0,70	0,6848	0,7046	66,0	36,3	16,5	1,4	19,4	62	2,80	2,8400	2,8330	200,0	62,0	450,0	0,4	8,4
28	1,37	1,6610	1,3720	47,7	136,0	60,8	2,0	9,1	63	0,68	0,7406	0,6940	28,5	17,0	120,0	7,0	11,0
29	0,90	0,9658	0,9637	91,0	29,0	41,8	2,1	12,6	64	0,87	0,9517	1,0060	61,0	12,5	31,0	1,7	4,2
30	2,60	2,2500	2,7460	65,0	450,0	80,0	0,7	1,7	65	1,06	1,4530	1,1360	460,0	37,8	77,0	0,5	6,6
31	0,30	0,3829	0,3270	36,0	28,0	16,2	0,5	2,2	66	2,27	2,1710	2,1730	515,0	132,0	93,0	0,3	2,7
32	0,50	0,5170	0,4815	36,0	8,4	180,0	1,5	25,0	67	1,74	1,9320	1,7310	210,0	28,5	130,0	1,7	12,2
33	21,1	17,660	23,660	5690	1200	260,0	0,9	5,2	68	0,99	1,2800	1,1820	63,0	49,0	13,0	0,7	8,1
34	0,61	0,6879	0,6903	65,0	85,0	37,0	0,2	1,2	69	0,61	0,7621	0,7084	47,0	48,0	24,0	0,8	9,0
35	1,29	1,0730	1,2200	68,0	90,0	38,0	0,2	1,0	70	0,56	0,5695	0,5713	102,0	44,0	13,0	0,6	5,2

Слід відзначити що для досить значної кількості підстанцій характерним виявився чотиришаровий ґрунт і для виконання розрахунків довелося застосувати методику еквівалентування з приведенням ґрунту до розрахункових дво- та тришарових моделей. Зокрема це виявилось характерним для ПС №5, №7, №9, №10, №15, №17, №24, №25, №28, №37, №39, №45, №52, №55, №56, №57, №58, №61, №62 та №67 (див. табл.1). Заземлювачі ПС №50 розташовані в п'ятишаровому ґрунті. Для всіх інших енергооб'єктів характерною є тришарова структура ґрунту.

Як видно з результатів розрахунку для абсолютної більшості випадків похибка розрахунку за допомогою створеного програмного комплексу «LiGro» δ_3 є меншою у порівнянні з δ_2 (розрахунок за допомогою двошарової моделі [12]). Це спостерігається у 71 % підстанцій. Крім того, слід відзначити, що у абсолютній більшості випадків (близько 74 %) для тришарової моделі похибка є додатною величиною. Це пов'язано з тим, що при моделюванні не було враховано роботу природних заземлювачів (фундаментів обладнання та тросових блискавковідводів, можливих приєднань до зовнішньої металеві огорожі тощо).

Однак для шести підстанцій фіксується значна

похибка ($\delta_3 > 25\%$) при визначенні опору ЗП. Для чотирьох з них (а саме ПС №10, №15, №50 та №52) це пояснюється впливом методичної похибки, яка виникла при використанні методики еквівалентування для приведення чотири- та п'яти шарової структури до розрахункової тришарової.

В інших двох випадках значна похибка пояснюється виносом потенціалу за межі електроустановки для ПС №12 по кабелям, а для ПС №50 по двом тросовим блискавковідводам, які в свою чергу приєднані до опор повітряних ліній класом напруги 35 кВ й грають роль природних додаткових заземлювачів. Для зменшення такої похибки й врахування виводу потенціалу необхідно проводити додаткові дослідження.

Таблиця 2 – Порівняння точності визначення опору ЗП для 64 підстанцій

Тип моделі:	Середня похибка $\delta_{\text{ср}}$, %	Кількість підстанцій, які потрапили в діапазон похибки, шт			
		$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$	$\pm 20\%$
двошарова [12]	17,6	14	28	41	46
тришарова «LiGro»	9,1	21	39	50	59

Враховуючи вище наведене пропонується провести аналіз модуля похибки розрахунку опору ЗП у порівнянні з експериментальним значенням без врахування зазначених шести підстанцій. Результати аналізу для вибірки з 64 підстанцій наведено в табл. 2.

Як бачимо з табл. 2 програмний комплекс «LiGro», який створено на основі математичної моделі нееквіпотенційного ЗП розташованого у тришаровому ґрунті, має значно меншу середню похибку (в 1,9 рази) у порівнянні з двошаровою моделлю [8] при визначенні опору ЗП, для нього фіксується більша кількість потраплянь визначених значень опору ЗП в припустимі діапазони похибки (в середньому на 31 %). Особливо це характерно для діапазонів $\pm 5\%$ та $\pm 10\%$, де кількість таких потраплянь збільшилась на 50 % та 39 % відповідно.

Висновок

1. Створено новітній програмний комплекс «LiGro» для визначення НП при імітації режимів КЗ на основі розробленої математичної моделі нееквіпотенційного ЗП, розташованого у тришаровому ґрунті. Показано, що за своїми параметрами комплекс відповідає світовим аналогам, а за рядом функцій та властивостей перевищує їх, що дозволяє використовувати його як інструмент при контролі стану ЗП діючих та проєктованих енергетичних об'єктів.

2. Доведена адекватність створеного програмного комплексу на основі порівняння результатів експериментальних досліджень для діючих високовольтних енергооб'єктів України з результатами розрахунку. Показано, що середня похибка визначення опору ЗП не перевищує 10 %, а при визначенні напруги дотику фіксується потрапляння у розрахунковий діапазон для понад 94 % експериментальних точок.

Список літератури

1. Колиушко Д.Г., Руденко С.С. Определение электрического потенциала, создаваемого заземляющим устройством в трехслойном грунте. Технічна електродинаміка. 2018. № 4. С. 19-24. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.019>

2. Глебов О.Ю., Колиушко Д.Г., Линк И.Ю. Определение напряжения прикосновения методом суперпозиции составляющих тока однофазного замыкания на землю. Вестник НТУ «ХПИ». 2005. № 49. С. 85-88.

3. Глебов О.Ю. та ін. Диагностика заземляющих устройств и систем молниезащиты объектов электроэнергетики на современном этапе. Вісник Національного технічного університету «ХПИ». 2015. № 51 (1160). С. 16-24.

4. Колиушко Д.Г. Совершенствование диагностики заземляющих устройств электроэнергообъектов : дис. ...канд. техн. наук: 05.11.13. Харків: 2003. 172 с.

5. Tabatabaei N.M., Mortezaeei S.R. Design of grounding systems in substations by ETAP intelligent software. International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering». 2010. № 1. P. 45-49.

6. Turri R., Andolfato R., Cuccarollo D. A numerical simulation tool for cathodic protection and electromagnetic interference analysis. NACE Milano Italia Section – Conference & Expo 2016 «A European event for the Corrosion Prevention of Oil&Gas industry». 17 p.

7. Zubov K.H. Совершенствование расчетных методов молниезащиты и заземляющих устройств в неоднородных

грунта : дис. ...канд. техн. наук: 05.09.03. Вологда: 2011. 158 с.

8. Chikarov Y., Tjing Lie T., Nair N. Safety parameters of grounding devices at an electric power plant. Electrical and Electronics Engineering: International Journal (ELELIJ). 2013. Vol 2, No 1. P. 1-20.

9. Rajesh Kumar, Kamal Bansal, Devender Kumar Saini, I.P.S. Paul Development of Empirical Formulas and Computer Program with MATLAB GUI for Designing of Grounding System in Two Layer Soil Resistivity Model for High Voltage Air Insulated and Gas Insulated Substations. Indian Journal of Science and Technology. 2016. Vol. 9 (28). P. 1-7. doi: 10.17485/ijst/2016/v9i28/96515

10. Huang H. et al. Analysis of a Large Grounding System and Subsequent Field Test Validation Using the Fall of Potential Method. Energy and Power Engineering. 2013. № 5. P. 1266-1272. doi:10.4236/epe.2013.54B240

11. Zhong-Xin Li, Ke-Li Gao, Yu Yin, Cui-Xia Zhang, Dong Ge Numerical Calculation for Lightning Response to Grounding Systems Buried in Horizontal Multilayered Earth Model Based on Quasi-Static Complex Image Method. Computational and Numerical Simulations. 2014. Chapter 18. P. 393-418. doi:10.5772/57049.

12. Линк И.Ю., Колиушко Д.Г., Колиушко Г.М. Математическая модель неэквивпотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте. Электронное моделирование. 2003. Т. 25, № 2. С. 99-111.

References (transliterated)

1. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Determination the electrical potential of a created grounding device in a three-layer ground. Technical Electrodynamics. 2018. No. 4. P. 19-24. (Rus). doi: 10.15407/techned2018.04.019

2. Glebov O.Yu., Koliushko D.G., Link I.Yu. Determination of the touch voltage by the method of superposition of current components of a single-phase earth fault. Bulletin of NTU «KhPI». 2005. No.49. P. 85-88. (Rus).

3. Glebov O.Yu. et al. Diagnostics of grounding devices and lightning protection systems of electric power facilities at the present stage. Bulletin of NTU «KhPI». 2015. No.51. P. 16-24. (Rus).

4. Koliushko D.G. Improving the diagnosis of grounding devices elektroenergoobektov: author's abstract of Can. tech. sci. diss. 05.11.13. Natsionalnyi Tekhnichnyi Universytet Kharkivskiy Polytekhnichnyi Instytut. Kharkiv: 2003. 172 p. (Rus)

5. Tabatabaei N.M., Mortezaeei S.R. Design of grounding systems in substations by ETAP intelligent software. International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering». 2010. Iss.2, vol.2, no.1. P. 45-49.

6. Turri R., Andolfato R., Cuccarollo D. A numerical simulation tool for cathodic protection and electromagnetic interference analysis NACE Milano Italia Section : Conference & Expo 2016 «A European event for the Corrosion Prevention of Oil&Gas industry». 2016. 17 p.

7. Zubov K.N. Improved computational methods for lightning protection and grounding devices in heterogeneous soil: author's abstract of Can. tech. sci. diss. 05.09.03. Lipetskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. Vologda. 2011. 158 p. (Rus).

8. Chikarov Y., Tjing Lie T., Nair N. Safety parameters of grounding devices at an electric power plant. Electrical and Electronics Engineering: International Journal (ELELIJ). 2013. Vol 2, no 1. P. 1-20.

9. Rajesh Kumar, Kamal Bansal, Devender Kumar Saini, Paul I.P.S. Development of Empirical Formulas and Computer Program with MATLAB GUI for Designing of Grounding System in Two Layer Soil Resistivity Model for High Voltage Air

Insulated and Gas Insulated Substations. Indian Journal of Science and Technology. 2016. Vol 9 (28). P. 1-7. doi: 10.17485/ijst/2016/v9i28/96515

10. *Huang H.* Analysis of a Large Grounding System and Subsequent Field Test Validation Using the Fall of Potential. Energy and Power Engineering, 2013, no 5, pp. 1266-1272. doi:10.4236/epe.2013.54B240

11. *Zhong-Xin Li, Ke-Li Gao, Yu Yin, Cui-Xia Zhang, Dong Ge* Numerical Calculation for Lightning Response to

Grounding Systems Buried in Horizontal Multilayered Earth Model Based on Quasi-Static Complex Image Method. Computational and Numerical Simulations. 2014. Chapter 18. P. 393-418. doi:10.5772/57049.

12. *Link I.Yu., Koliushko D.G., Koliushko G.M.* A mathematical model is not an equipotential ground grids substation placed in a double layer. Electronic modeling. 2003. Vol.25, no.2. P. 99-111. (Rus).

Надійшла (received) 07.10.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Руденко Сергій Сергійович (Руденко Сергей Сергеевич, Rudenko Serhii) – кандидат технічних наук, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ», старший науковий співробітник; м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-2544-1545>; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Коліушко Денис Георгійович (Колушко Денис Георгиевич, Koliushko Denys) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ «ХПІ», старший науковий співробітник кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3112-4260> e-mail: denny4791@kpi.kharkov.ua

Істомін Олександр Євгенович (Истомин Александр Евгеньевич, Istomin Alexandr) – кандидат технічних наук, доцент, НТУ «ХПІ», доцент кафедри інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин імені О.О. Морозова; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5709-6459>; e-mail: istomin@kpi.kharkov.ua

ЗМІСТ

<i>С.Г. Буряковський, А.С. Маслій, Д.П. Помазан, О.Е. Сафронов, О.Г. Туренко</i> Підвищення енергоефективності маневрового тепловоза шляхом застосування накопичувачів енергії	3
<i>О.М. Васильєва, О.В. Макаров</i> Експериментальні дослідження розподілу електромагнітного поля в GTEM-камері для проведення випробувань з електромагнітної сумісності	12
<i>О.М. Васильєва, О.В. Макаров</i> Дослідження невизначеності відтворення одиниці напруженості електромагнітного поля в GTEM-камері для проведення випробувань з електромагнітної сумісності	19
<i>В.В. Князев, В.И. Кравченко, И.В. Яковенко</i> Электромагнитная совместимость полупроводниковых приборов технических средств в условиях воздействия внешнего электромагнитного излучения	26
<i>В.В. Князев, П.М. Мельников, О.Ю. Чернухін</i> Створення експериментального зразка установки для реалізації випробувань імпульсним електричним полем, що супроводжує блискавку	33
<i>В.Е. Марценюк, А.А. Петков</i> Выбор оптимальных параметров генератора тока для формирования испытательных импульсов магнитного поля	39
<i>А.С. Маслій, Н.П. Карпенко, О.Г. Туренко, О.Е. Сафронов, П.А. Головка</i> Математичне моделювання вентильно-індукторного електроприводу для маневрового тепловозу	44
<i>В.В. Пілінський, О.С. Ратушний, Д.В. Тітков</i> Аналіз електромагнітної обстановки пристроїв Інтернету речей у приміщенні	50
<i>С.С. Руденко, Д.Г. Коліушко, О.Є. Істомін</i> Розрахунок заземлювальних пристроїв за допомогою програмного комплексу «LiGro»	55

CONTENTS

<i>S.G. Buryakovsky, A.S. Masliy, D.P. Pomazan, O.E. Safronov, O.G. Turenko</i> Enhancing energy efficiency of maneuvering diesel locomotives by the application of energy storage devices	3
<i>O.M. Vasilyeva, O.V. Makarov</i> Experimental studies of the electromagnetic field distribution in a GTEM camera for conducting electromagnetic compatibility tests	12
<i>O.M. Vasilyeva, O.V. Makarov</i> Investigation of the uncertainty of the reproduction of a unit of electromagnetic field strength in a GTEM camera for conducting electromagnetic compatibility tests	19
<i>V.V. Knyazev, V.I. Kravchenko, I.V. Yakovenko</i> Electromagnetic compatibility of semiconductor devices of technical means in conditions of action of external electromagnetic radiation	26
<i>V.V. Kniaziev, P.M. Melnikov, O.Yu. Chernukhin</i> Creation of an experimental sample of installation for implementation of tests by pulse electric field associating lightning	33
<i>V. Martseniuk, A.A. Petkov</i> Selection of optimal parameters of the current generator for forming magnetic field test pulses	39
<i>A. Masliy, N. Karpenko, O. Turenko, O. Safronov, P. Golovko</i> Mathematical modeling of switched-reluctance electric drive for maneuvering diesel locomotive	44
<i>V.V. Pilinsky, O.S. Ratushnyi, D.V. Titkov</i> Analysis of the electromagnetic environment of internet of things devices indoors	50
<i>S.S. Rudenko, D.G. Koliushko, A.E. Istomin</i> Calculation of grounding devices using the "LiGro" software complex	55

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»
СЕРІЯ: ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Збірник наукових праць

№ 27 (1352) 2019

Науковий редактор: Кравченко В.І., д-р техн. наук, професор
Технічний редактор: Ваврів Л.В., канд. фіз.-мат наук, ст. наук. співр.
Відповідальний за випуск: Шайда В.П., канд. техн. наук

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

Підп. до друку 14.12.2019 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,15. Облік.-вид. арк. 8,45.
Тираж 300 пр. 1-й завод 1-100. Зам. № 27. Ціна договірна.

Друкарня ВАТ «Цифра Прінт».

Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 03.08.2009 р.
Адреса: 61166, м. Харків, вул. Данилевського, 30
