

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:

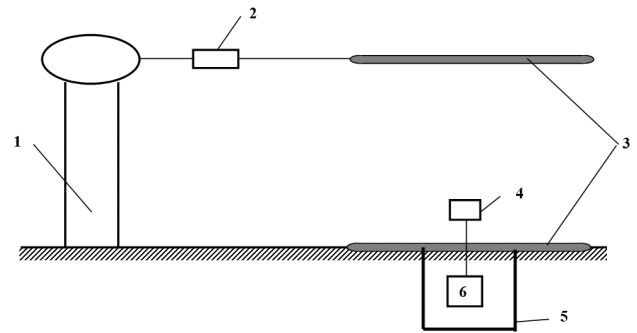


Рисунок 1 – Спрощена схема експериментальної випробувальної установки NL254-E:

- 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.

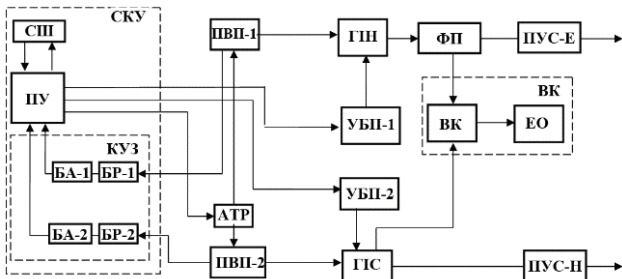


Рисунок 2 – Структурна схема випробувального високовольтного стенду ВВС-1.2 у режимі генерування Е-поля:

- СКУ – система контролю та управління;
 СПШ – силова шафа;
 ПУ – пульт управління;
 КУЗ – комплекс управління зарядом ГН та ГПС;
 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;
 ГПС – генератор імпульсних струмів;
 УБП-1, УБП-2 – універсальний блок підпалу;
 ФП – формуючий пристрій;
 ЕК – екранована кабіна;
 ВК – вимірювальний комплекс;
 ЕО – електронний осцилограф

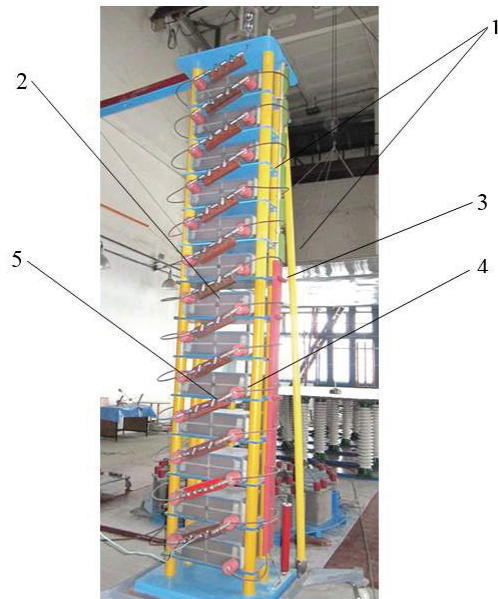


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд ГН-1.2:

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

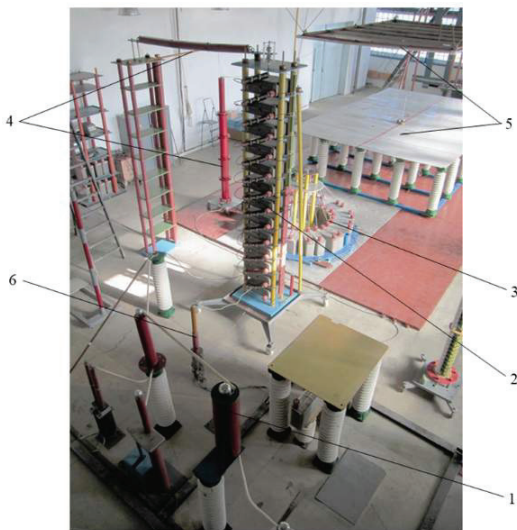


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд випробувального стенду:

- 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 $3,5 \times 5,0 \text{ м}^2$, 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 $4,0 \times 6,5 \text{ м}^2$ 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 $3 \times 4 \times 2 \text{ м}^3$, 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

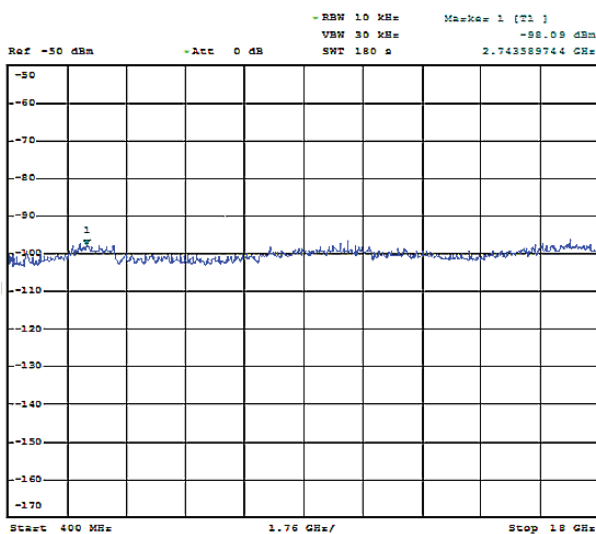


Рисунок 7 – Спектрограма рівня завад в ВБ:
За вертикаллю – дБм, за горизонталлю – частота
(діапазон від 400 МГц до 18 ГГц)

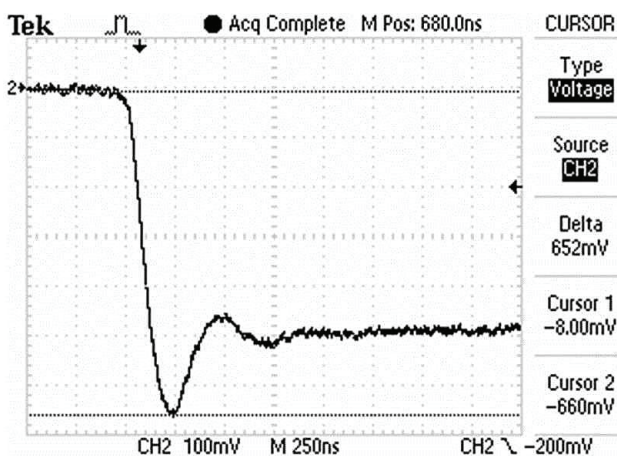


Рисунок 8 – Типова осцилограма напруги з виходу вимірювача ВНЕП-1К при зарядній нарузі ГІН – 15,7 кВ

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.

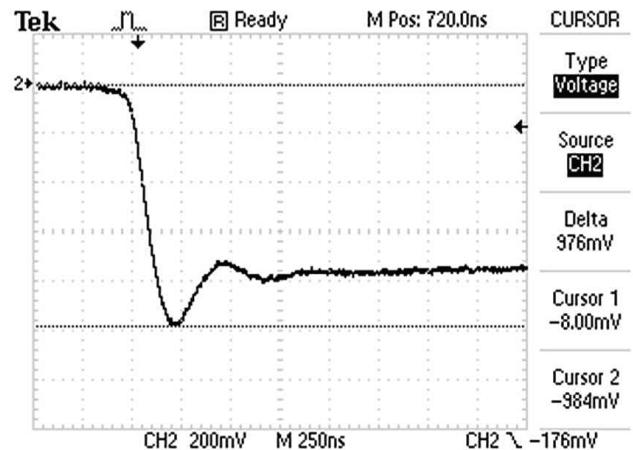


Рисунок 9 – Типова осцилограма напруги з виходу вимірювача ВНЕП-1К при зарядній нарузі ГІН – 24,5 кВ

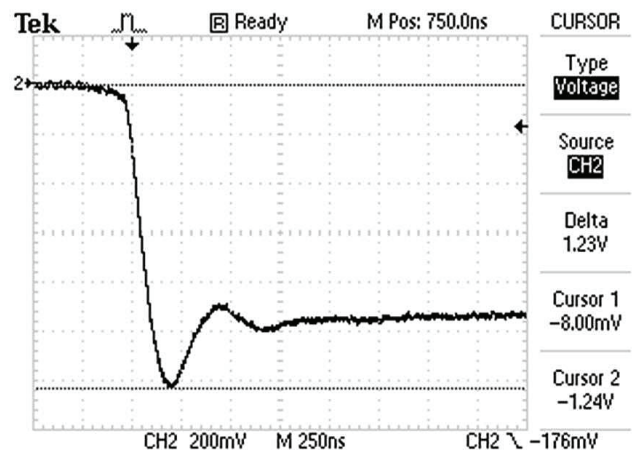


Рисунок 10 – Типова осцилограма напруги з виходу вимірювача ВНЕП-1К при зарядній нарузі ГІН – 30,5 кВ

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_0 , 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. ДСТУ 3681-98 (ГОСТ 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-