



УДК 006.9:537.8:621.317.32

Запровадження стандартів НАТО для підвищення електромагнітної стійкості та сумісності обладнання об'єктів критичної інфраструктури

П.І. Неєжмаков¹, С.Г. Буряковський², О.М. Васильєва¹, В.А. Величко³,
Ф.В. Веніславський⁴, С.С. Руденко²

¹ Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Миросицька, 42, 61002, Харків, Україна
pavel.neuzhnikov@metrology.kharkov.ua

² Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут "Молнія"
НТУ "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна
sergbyr@i.ua

³ ДП "Харківстандартметрологія", вул. Миросицька, 36, 61000, Харків, Україна
hcsms.12@gmail.com

⁴ Комітет Верховної Ради України з питань національної безпеки, оборони та розвідки,
вул. Грушевського, 5, 01008, Київ, Україна
venislavskiy@gmail.com

Анотація

Забезпечення відповідності вітчизняної техніки сучасним вимогам безпеки і надійності згідно зі стандартами НАТО є актуальною проблемою в Україні. Без метрологічного забезпечення випробувань на електромагнітну сумісність та стійкість до дії потужних електромагнітних полів природного і штучного походження неможливе надійне та безпечне використання сучасного електронного, електроенергетичного та електротехнічного обладнання об'єктів критичної інфраструктури.

У статті наведено шляхи метрологічної простежуваності державних еталонів у галузі електромагнітних вимірювань, які створені в ННЦ "Інститут метрології", до одиниць SI. Описано результати досліджень створеного в ННЦ "Інститут метрології" еталона одиниці напруженості електромагнітного поля у діапазоні 0,01 МГц – 43 ГГц НДЕТУ ЕМ-05-2021. Показано зв'язок НДЕТУ ЕМ-05-2021 з еталонами одиниці потужності електромагнітних коливань у коаксіальних і хвилеводних трактах та еталона електричної напруги змінного струму.

Наведено переліки випробувань згідно зі стандартом АЕСТР-500, які підтримуються еталонами ННЦ "Інститут метрології", та апаратури, яку можна відкалібрувати на національних еталонах. Надано приклади випробувань на електромагнітну сумісність, що проводяться у випробувальному центрі ДП "Харківстандартметрологія".

За результатами розроблення статистичних моделей у НДПКІ "Молнія" для прогнозування вразливості щодо електромагнітного впливу атмосферних явищ на об'єкти критичної інфраструктури показано приклади розподілу ліній рівного потенціалу (в кіловольтах) на поверхні землі в режимі короткого замикання та розподіли щільності ймовірності влучання блискавок. Наведено змодельовані на основі розрахунків розподіли ліній рівного потенціалу на поверхні землі в режимі короткого замикання високовольтних підстанцій.

Ключові слова: стандарти; еталони; метрологічна простежуваність; калібрування; випробування; електромагнітна сумісність; електромагнітна стійкість; критична інфраструктура.

Отримано: 17.03.2023

Відредаговано: 28.03.2023

Схвалено до друку: 31.03.2023

Вступ

Забезпечення стійкості технічних об'єктів до дії потужних електромагнітних полів природного і штучного походження, зокрема спричинених використанням військових або терористичних засобів електромагнітного враження, є важливою технічною проблемою, без вирішення якої не-

можливе надійне та безпечне використання сучасного електронного, електроенергетичного та електротехнічного обладнання (рис. 1). Особливо важливим є забезпечення електромагнітної стійкості об'єктів військової техніки, а також об'єктів критичної інфраструктури. Ця проблема, зазвичай, вирішується шляхом проведення

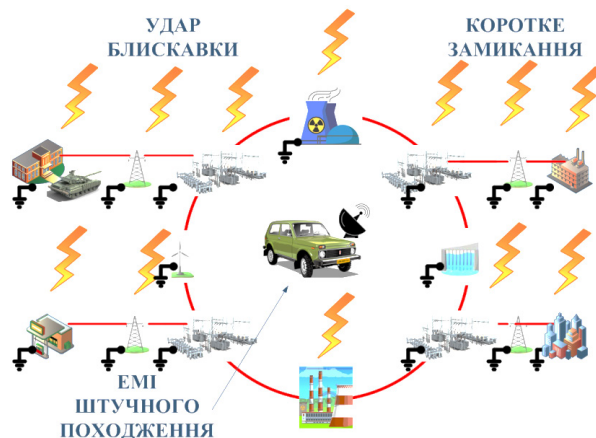


Рис. 1. Джерела електромагнітного впливу, що можуть дестабілізувати роботу об'єктів критичної інфраструктури

стандартизованих та простежуваних до одиниць Міжнародної системи (SI) процедур випробувань.

В Україні актуальною проблемою є забезпечення відповідності вітчизняної техніки сучасним вимогам безпеки і надійності згідно зі стандартами НАТО та ЄС. Існуюче технічне обладнання і методична база для проведення випробувань за новими стандартами були можливі лише частково і вимагали значного доопрацювання.

Метою запровадження стандартів НАТО є забезпечення максимальної сумісності результатів випробувань, що виконуються в Україні, з аналогічними випробуваннями, що проводяться в країнах Європейського Союзу. Впровадження стандартів НАТО в Україні є важливим елементом реформування сектору безпеки та оборони України й одним із найоптимальніших шляхів підвищення рівня обороноздатності. Система стандартів НАТО об'єднана у складну систему нормативних документів, що стосуються стандартизації. Серед них можна виділити:

- союзні стандарти: власне стандарти НАТО (A...P – Allied Publications, M...P – Multinational Publications) та стандарти окремих держав-членів НАТО;

- супровідні документи: угоди зі стандартизації (STANAG – Standardization Agreement) та рекомендації зі стандартизації (STANREC – Standardization Recommendation);

- інші документи, які пов'язані зі стандартами (SRD – Standardization Related Documents).

Характеристики наданої на ринку або введеної в експлуатацію в Україні продукції чи пов'язані з ними процеси та методи виробництва, які визначено в чинних Технічних регламентах, підлягають обов'язковим випробуванням.

Так, наприклад, вимоги з електромагнітної сумісності технічних засобів регламентуються Технічним регламентом України з електромагнітної сумісності обладнання (ТР EMC) [1], який затверджено Постановою Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2015 р. №1077. Обов'язковим елементом документального підтвердження відповідності обладнання вимогам ТР EMC є про-

токоли випробувань. Специфіка зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) може обумовлювати особливі вимоги за параметрами EMC, зокрема й стосовно рівня несприйнятливості до впливу зовнішніх електромагнітних завад, але якщо немає відповідних стандартів на конкретний вид ОВТ, то випробування проводять на відповідність вимогам до цивільного обладнання.

Технічний регламент з електромагнітної сумісності обладнання встановлює вимоги, згідно з якими обладнання має відповідати належному рівню електромагнітної сумісності. Технічний регламент розроблено на основі Директиви 2014/30/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 26 лютого 2014 р. про гармонізацію законодавства держав-членів стосовно електромагнітної сумісності [2]. Дія цього Технічного регламенту поширюється на будь-яку апаратуру або стаціонарну установку. З урахуванням того, що дія цього регламенту не поширюється на спеціальну (військову) техніку, запровадження стандартів НАТО для випробувань на електромагнітну стійкість, а саме стандарту АЕСТР-500:2016 “Випробування та перевірка електромагнітних впливів на навколишнє середовище” [3] та стандарту MIL-STD 461G:2015 “Вимоги щодо контролю електромагнітних завад. Характеристики підсистем і обладнання” [4], є наразі необхідним.

Враховуючи необхідність забезпечення енергетичної безпеки держави та щільний взаємозв'язок між об'єктами критичної інфраструктури, їх відповідність вимогам стандартів з EMC в умовах гібридної агресії та повномасштабного вторгнення відіграє одну з провідних ролей у галузі забезпечення національної безпеки України.

1. Забезпечення метрологічної простежуваності електромагнітних вимірювань до одиниць SI

Забезпечення метрологічної простежуваності електромагнітних вимірювань в Україні до одиниць Міжнародної системи (SI), крім розвитку і функціонування таких традиційних галузей, як електротехнічна, радіоелектронна та приладобудівна промисловість, радіовимірювальна техніка,



Рис. 2. Схема простежуваності еталонів ЕМ

радіомовлення та зв'язок, наукові дослідження у галузі медицини та біології, а також при вивченні властивостей матеріалів і дистанційного зондування Землі, необхідне для утримання та безпечного функціонування обладнання об'єктів критичної інфраструктури, таких як атомні електростанції та магістральні підстанції, об'єкти збереження та транспортування пально-мастильних матеріалів, конфайнмент ЧАЕС тощо.

Розвиток радіоелектронних систем зв'язку, радіолокації, радіодалекометрії, телеметрії з великими інформаційними потоками і систем наведення, що мають високу точність, скритність, малі габарити і масу, повинен супроводжуватися розробкою нового покоління приладів та вимірювальних комплексів у надвисокому частотному діапазоні (НВЧ-діапазоні).

Вирішення проблеми забезпечення метрологічної простежуваності результатів вимірювань в НВЧ-діапазоні, особливо для антенних вимірювань, потребує подальшого розвитку національних еталонів і створення системи вторинних та робочих еталонів для калібрування апаратури, що використовується для проведення вимірювань в НВЧ-діапазоні, в тому числі при проведенні випробувань на відповідність стандартам НАТО.

Відповідно до введеної в дію у 2019 році Міжнародної системи одиниць (SI) національні еталони в галузі електромагнітних вимірювань (ЕМ), що є первинними, простежуються до визначальних сталих, а саме частоти надтонкого квантового переходу в цезії ν_{Cs} , сталої Планка h , елементарного заряду (електрона e). Схему простежуваності наведено на рис. 2.

2. Національний еталон одиниці напруженості електромагнітного поля

Створення еталона одиниці напруженості електромагнітного поля (ЕМП) надало можливість проведення калібрування різного типу антен та вимірювачів рівнів ЕМП, а також проведення випробувань з електромагнітної сумісності (ЕМС) апаратури спеціального призначення на високих рівнях напруженості ЕМП.

Створення еталона напруженості електромагнітного поля у діапазоні 0,01 МГц – 43 ГГц стало можливим завдяки наявності в ННЦ “Інститут метрології” національних еталонів України одиниці потужності електромагнітних коливань у коаксіальних і хвилеводних трактах та еталона електричної напруги змінного струму. Елементи еталона одиниці напруженості електромагнітного поля можуть бути відкалібровані за допомогою цих еталонів, що забезпечує метрологічну простежуваність до електричних та магнітних одиниць SI, з мінімальною невизначеністю.

За результатами досліджень можливих варіантів побудови еталонних засобів відтворення одиниці напруженості електромагнітного поля в діапазоні частот від 0,01 МГц до 43 ГГц було прийнято рішення створити еталон одиниці напруженості електромагнітного поля у вигляді двох еталонних установок для різних діапазонів частот. Перша еталонна установка відтворює одиницю електромагнітного поля у діапазоні частот від 10 кГц до 1 ГГц на базі GTEM-камери [5], друга – у діапазоні частот від 1 до 43 ГГц на базі безлунневої камери.



Рис. 3. Установка 1 НДЕТУ ЕМ-05-2021 у діапазоні частот 0,01 МГц – 1 ГГц



Рис. 4. Установка 2 НДЕТУ ЕМ-05-2021 у діапазоні частот 1–43 ГГц

У 2021 році в ННЦ “Інститут метрології” еталону було надано статус національного з позначенням НДЕТУ ЕМ-05-2021. Загальний вигляд установок національного еталона наведено на рис. 3 та 4.

При створенні еталона електромагнітного поля було виконано комп’ютерне моделювання розподілу електромагнітного поля в ГТЕМ-камері з використанням пакету чисельного моделювання COMSOL Multiphysics 5.4. Метою моделювання була оцінка просторового розподілу амплітудно-фазових параметрів електромагнітного поля в ГТЕМ-камері.

Така оцінка необхідна для:

- визначення областей однорідності ТЕМ-хвилі в камері на різних частотах;
- оптимізації параметрів камери, що регулюються (положення й орієнтації екранів із радіо-

частотного абсорбера, відстані від передавальної антени і т.п.);

– проведення попередніх комп’ютерних експериментів з моделями безлунневої камери і розміщених у ній об’єктів;

– отримання інформації про параметри поля, що розсіюється, недоступні при прямому вимірюванні, на підставі розрахункових даних.

Науково-технічний рівень еталона та його метрологічні властивості відповідають сучасному світовому рівню науки і техніки. У табл. 1 у порівнянні з аналогічними еталонами інших країн наведено характеристики: діапазон частоти та відносну розширену невизначеність, із якою на НДЕТУ ЕМ-05-2021 можна калібрувати обладнання. Можливості еталона щодо забезпечення метрологічної простежуваності

Порівняльна таблиця еталонів напруженості електромагнітного поля

№ п/п	Країна (національний метрологічний інститут)	Діапазон частот	Відносна розширена невизначеність послуг з калібрування
1	Велика Британія (NPL)	від 240 МГц до 40,0 ГГц	0,35–0,65 дБ
2	Італія (INRIM)	від 200 до 1000 МГц від 500 МГц до 18 ГГц	1,6 дБ 1,2 дБ
3	Німеччина (PTB)	від 10 кГц до 1000 МГц від 1 до 1000 МГц від 1,1 до 18,0 ГГц	0,6 дБ 0,4–1,0 дБ 1,4 дБ
4	Південна Корея (KRISS)	від 200 МГц до 18 ГГц	1,0 дБ
5	США (NIST)	від 10 кГц до 300 МГц від 200 до 450 МГц від 0,45 до 40,0 ГГц	0,59 дБ 0,61 дБ 0,61 дБ
6	Україна (ННЦ “Інститут метрології”)	від 10 кГц до 1000 МГц від 1 до 18 ГГц від 18 до 43 ГГц	0,5 дБ 0,55 дБ 0,6 дБ

результатів вимірювань одиниці напруженості електромагнітного поля дозволяють проведення калібрування різного типу антен і вимірювачів рівнів електромагнітного поля.

Аналіз характеристик апаратури і методів вимірювань дає значення невизначеності вимірювання калібрувального коефіцієнта антен не більше $\pm 0,5$ дБ, значення невизначеності калібрування вимірювачів рівнів електромагнітного поля не перевищує 1 дБ. НДЕТУ ЕМ-05-2021 дозволяє калібрувати практично всі типи рупорних антен (активних і пасивних) діапазону частот вище 1 ГГц (М3115, М3116, НL050, П6-23, рупорних антен комплексів радіомоніторингу ССТК та ін.), малогабаритних антен (активних і пасивних) діапазону частот 9 кГц – 1 ГГц (DP-1, DP-3, HE300, АИ5,0 та ін.), усіх вимірювачів напруженості електромагнітного поля в частотному діапазоні еталона (ПЗ-17, ПЗ-31, ПЗ-41 та ін.).

Можливий діапазон параметрів приладів при калібруванні:

- діапазон калібрувального коефіцієнта антен мінус 30–20 дБ;
- діапазон коефіцієнта підсилення антен мінус 10–35 дБ;
- діапазон напруженості електромагнітного поля вимірювачів напруженості від 1 до 10 В/м.

3. Забезпечення простежуваності результатів вимірювань при проведенні випробувань на відповідність стандартам НАТО

АЕСТР-500 є одним із шести документів, які входять до STANAG 4370 [3]. В АЕСТР-500 містяться вимоги до випробувань щодо електромагнітних впливів навколишнього середовища (ЕЗ) і процедури, необхідні для забезпечення того, щоб військові платформи, системи, підсистеми та обладнання були розроблені відповідно до вимог електромагнітної сумісності. Стандарт АЕСТР-500 також розглядає вплив готових комерційних

товарів, що використовуються разом з апаратурою спеціального призначення. Широке використання такого обладнання може призвести до того, що комплексні системи стануть більш уразливими. Оскільки більшість комерційного обладнання було розроблено відповідно до менш суворих вимог ЕМС, ніж військового обладнання, воно може бути більш уразливим до збоїв або пошкоджень під впливом радіочастотних полів високого рівня або може створювати завади.

Необхідність високоточного вимірювання радіочастотних сигналів як при емісії, так і при впливі електромагнітних полів найбільш важлива, коли збурення мають граничні значення щодо норм діючих стандартів. Тому при калібруванні обладнання, що використовується при проведенні випробувань, необхідно застосування еталонів, що забезпечують мінімально можливу невизначеність вимірювань. У табл. 2 надано інформацію про національні еталони України в галузі електромагнетизму (ЕМ), що розроблені та зберігаються в ННЦ “Інститут метрології”. Перелік випробувань згідно зі стандартом АЕСТР-500, які підтримуються еталонами ННЦ “Інститут метрології”, наведено в табл. 3.

У табл. 4 наведено класи апаратури і їх основні параметри, що потребують особливо точного калібрування, яке можна провести на національних еталонах.

У 2021–2023 рр. на цих еталонах для потреб випробувань з ЕМС таких організацій, як НДПКІ “Молнія” і ТОВ ВСЦ “ПІВДЕНТЕСТ”, було відкалібровано мультиметри, осцилографи, аналізатори спектра і селективні мілівольтметри, антени, вимірювачі електричного і магнітного полів та іншу апаратуру (струмовимірювальні кліщі, струмові шунти, високовольтні щупи тощо). ННЦ “Інститут метрології” у 2021 р. провів дослідження для ПАТ “Завод “Кузня на Рибальському” із забезпечення електромагнітної сумісності виробу “корабель СРЗК”.

Національні еталони України в галузі електрики та магнетизму та підтверджена метрологічна простежуваність (опубліковані калібрувальні та вимірювальні можливості (СМС-рядки) в базі даних ключових звірень Міжнародного бюро з мір та ваг (KCDDB))

Найменування національного еталона	Метрологічні характеристики національного еталона (діапазони значень (значення) одиниці, невизначеність та ін.)	Кількість СМС-рядків
НДЕТУ ЕМ-04-2021 Національний (державний первинний) еталон одиниці дев'яти частоти частотно-модульованих коливань	від 10 Гц до 1 МГц від 1 до 8 МГц модулюючі частоти: від 20 Гц до 200 кГц від 200 Гц до 500 кГц несучі частоти: 10 МГц, 50 МГц, до 1000 МГц 10 МГц, 50 МГц, до 6 ГГц $U=1 \times 10^{-3}$	1 СМС
НДЕТУ ЕМ-05-2021 Національний (державний первинний) еталон одиниці напруженості електромагнітного поля у діапазоні частот від 0,01 МГц до 43 ГГц	від 1 до 10 В/м у діапазоні частот від 0,01 МГц до 43 ГГц $U=4,7 \times 10^{-2}$	Проходить міжнародні звірення
НДЕТУ ЕМ-06-2021 Національний (державний первинний) еталон одиниці електричного опору	Значення електричного опору, за якого відтворюється одиниця на квантовій мірі Холла, становить 2 906,4035 Ом Діапазон значень, в якому передається одиниця: від 1×10^{-4} Ом до 1×10^{12} Ом U залежно від розміру одиниці: 1×10^{-3} Ом – 8×10^{-7} 1×10^{-4} Ом – 1×10^{-6} 1×10^6 Ом – $1,2 \times 10^{-8}$ 1×10^9 Ом – 1×10^{-7} 1×10^{12} Ом – 6×10^{-5} 1 Ом, 100 Ом і 10 кОм – 1×10^{-7}	3 СМС
ДЕТУ 08-01-96 Державний первинний еталон одиниці магнітної індукції в діапазоні від 0,05 до 2 Тл	від 0,05 до 2 Тл $U=4 \times 10^{-6}$	1 СМС
ДЕТУ 08-03-07 Державний первинний еталон одиниці електрорушійної сили та сталої напруги	від 0,01 до 10 В $U=1,4 \times 10^{-8}$	–
ДЕТУ 09-01-96 Державний первинний еталон одиниці коефіцієнта гармонік	від 0,01% до 100% (0,01; 0,02; 2; 20; 100; 200) кГц $U_{\max} = 0,0031 + 0,011 \cdot K_f$	1 СМС
ДЕТУ 09-02-96 Державний первинний еталон одиниці коефіцієнта амплітудної модуляції височастотних коливань	від 0,1% до 100% $U=0,0017-0,0032$	1 СМС
ДЕТУ 09-04-96 Державний первинний еталон одиниці потужності електромагнітних коливань у хвилеводних трактах у діапазоні частот від 37,5 до 178,6 ГГц	від 37,5 до 178,6 ГГц від 1×10^{-3} до 1×10^{-2} Вт від 37,5 до 78,3 ГГц $U=4,2 \times 10^{-3}$ від 78,3 до 178,6 ГГц $U=8,5 \times 10^{-3}$	2 СМС
ДЕТУ 09-05-04 Державний первинний еталон одиниці електричної напруги змінного струму в діапазоні частот від 30 до 1000 МГц	від 0,1 до 3 В $U=4,1 \times 10^{-4} - 2,9 \times 10^{-3}$	8 СМС
ДЕТУ 09-06-05 Державний первинний еталон одиниці потужності електромагнітних коливань в коаксіальних трактах у діапазоні частот від 0,03 до 18 ГГц	від 1×10^{-3} до 1×10^{-2} Вт $U=4 \times 10^{-3} - 6,2 \times 10^{-3}$	2 СМС

Тут U – розширена невизначеність ($k=2, P=0,95$).

Перелік випробувань за АЕСТР-500

Випробування за АЕСТР-500	Вимірювання параметра	Еталон ННЦ "Інститут метрології"
NCE01	Кондуктивне випромінювання, дроти живлення, від 30 Гц до 10 кГц	ДЕТУ 09-02-96 НДЕТУ ЕМ-4-2021
NCE02	Кондуктивне випромінювання, дроти живлення, від 10 кГц до 10 МГц	ДЕТУ 09-02-96 ДЕТУ 09-05-04 НДЕТУ ЕМ-4-2021
NCE03	Кондуктивне випромінювання, антенний вхід, від 10 кГц до 40 ГГц	ДЕТУ 09-02-96 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-04-96
NCE04	Кондуктивне випромінювання, перехідні процеси на дротах живлення	ДЕТУ 09-02-96 ДЕТУ 09-05-04 НДЕТУ TF-01-2021
NCE05	Кондуктивне випромінювання, живлення, управління і сигнальні ланцюги, від 30 Гц до 150 МГц	ДЕТУ 09-02-96 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-05-04 НДЕТУ ЕМ-4-2021 НДЕТУ TF-01-2021
NCS01	Кондуктивна сприйнятливність, електродроти, від 30 Гц до 150 кГц	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96
NCS02	Кондуктивна сприйнятливність, контроль і сигнальні відводи, від 20 Гц до 50 кГц	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96 НДЕТУ ЕМ-4-2021
NCS03	Кондуктивна сприйнятливність, порт антени, інтермодуляція дротів, від 15 кГц до 10 ГГц	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-05-04
NCS04	Кондуктивна сприйнятливність, порт антени, придушення небажаних сигналів, від 30 Гц до 20 ГГц	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96 ДЕТУ 09-06-05
NCS05	Кондуктивна сприйнятливність, порт антени, перехресна модуляція, від 30 Гц до 20 ГГц	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96 ДЕТУ 09-06-05
NCS06	Кондуктивна сприйнятливність, структурний струм, від 60 Гц до 100 кГц	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96
NCS07	Кондуктивна сприйнятливність, інжекція струму, від 10 кГц до 200 МГц	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96 НДЕТУ ЕМ-4-2021
NCS08	Кондуктивна сприйнятливність, імпульсна інжекція струму, від 10 кГц до 200 МГц	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-05-04 НДЕТУ ЕМ-4-2021
NCS09	Кондуктивна сприйнятливність, затухаючі синусоїдальні перехідні процеси Кабелі та дроти живлення, від 10 кГц до 100 МГц	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-05-04
NCS10	Кондуктивна сприйнятливність, наведений перехідний процес блискавки (літаки/зброя)	НДЕТУ ЕМ-4-2021
NCS11	Кондуктивна сприйнятливність, наведена низька частота ввімкнення Дроти живлення (кораблі)	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96 НДЕТУ ЕМ-4-2021
NCS12	Кондуктивна сприйнятливність. Електростатичний розряд	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96 ДЕТУ 09-05-04
NCS13	Кондуктивна сприйнятливність, перехідні процеси на дротах електроживлення	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96 НДЕТУ ЕМ-4-2021
NRE01	Випромінювання, магнітне поле, від 0 Гц до 100 кГц	–
NRE02	Випромінювання, електричне поле, від 10 кГц до 18 ГГц	ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ ЕМ-05-2021
NRE03	Випромінювання, паразитне та гармонічне випромінювання, антенні виходи, від 10 кГц до 40 ГГц	ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-04-96 ДЕТУ ЕМ-05-2021 НДЕТУ TF-01-2021
NRS01	Сприйнятливність до випромінювання, магнітне поле, від 30 Гц до 100 кГц	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-05-04
NRS02	Сприйнятливність до випромінювання, електричне поле, від 2 МГц до 40 ГГц	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-04-96 ДЕТУ ЕМ-05-2021 НДЕТУ TF-01-2021
NRS03	Сприйнятливність до випромінювання, імпульсне електромагнітне поле	–
NRS04	Сприйнятливність до випромінювання, магнітне поле (DC)	ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96 НДЕТУ ЕМ-4-2021

Класи апаратури, що потребують калібрування

Клас апаратури	Характеристики, що потребують калібрування	Вид випробувань за АЕСТР-500	Національний еталон, що можна використати для калібрування
Генератори сигналів	Діапазон частот Чистота спектра вихідного сигналу Рівень вихідного сигналу	NCS01-NCS05, NCS09, NCS12, NRS01, NRS02, NRS04	НДЕТУ TF-01-2021 ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96 НДЕТУ ЕМ-04-2021 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-04-96 ДЕТУ 09-05-96
Підсилювачі потужності	Діапазон частот Коефіцієнт посилення Рівень вихідного сигналу Чистота спектра вихідного сигналу	NCS03, NCS04, NCS05, NRS01, NRS02, NRS04	ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-04-96 НДЕТУ ЕМ-04-2021
Приймальні антени	Діапазон частот Коефіцієнт посилення Антенний фактор	NRE01, NRE02	НДЕТУ TF-01-2021 НДЕТУ ЕМ-05-2021 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-04-96
Передавальні антени	Діапазон частот Коефіцієнт посилення Антенний фактор	NRS01, NRS02, NRS04	НДЕТУ TF-01-2021 НДЕТУ ЕМ-05-2021 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-04-96
Давачі електромагнітного поля	Діапазон частот Коефіцієнт калібрування	NRE01, NRE02 NRS01, NRS02, NRS04	НДЕТУ ЕМ-05-2021 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-04-96
Вимірювальний приймач	Діапазон частот Динамічний діапазон Чутливість Точність вимірювання рівня вхідного сигналу	NCE01-NCE05, NRE03	НДЕТУ TF-01-2021 НДЕТУ ЕМ-04-2021 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-04-96
Вимірювач потужності	Діапазон частот Динамічний діапазон Чутливість Точність вимірювання рівня вхідного сигналу	NRS01, NRS02, NRS04	НДЕТУ TF-01-2021 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-04-96
Спрямований відгалужувач	Діапазон частот Коефіцієнт відгалужування Коефіцієнт спрямованості	NRS01, NRS02, NRS04	НДЕТУ TF-01-2021 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-04-96
Атенюатор	Діапазон частот Коефіцієнт загасання	NRS01, NRS02, NRS04	НДЕТУ TF-01-2021 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-04-96
Еквівалент мережі (50 μ H LISNs)	Діапазон частот Калібрувальний коефіцієнт	NCE01-NCE05, NCS01- NCS11, NCS12-NCS13	НДЕТУ TF-01-2021 НДЕТУ ЕМ-04-2021 ДЕТУ 09-05-96
Осцилограф	Діапазон частот Динамічний діапазон Точність вимірювання напруги сигналу, форми сигналу, часу наростання та спадання імпульсного сигналу	NCS12, NCS13, NCS09, NCS10, NCS11, NR03	НДЕТУ TF-01-2021 ДЕТУ 09-01-96 ДЕТУ 09-02-96 НДЕТУ ЕМ-04-2021 ДЕТУ 09-06-05 ДЕТУ 09-04-96 ДЕТУ 09-05-96

4. Випробування електронних приладів та систем у ДП “Харківстандартметрологія”

У ДП “Харківстандартметрологія” створено випробувальний центр, перспективним напрямком діяльності якого є випробування на ЕМС у сфері військового та телекомунікаційного призначення,

в тому числі: вимірювання напруженості поля радіо-завад відповідно до ДСТУ EN 55011, ДСТУ EN 55014-1, ДСТУ EN IEC 55015, ДСТУ EN 55022, ДСТУ EN 55032, ДСТУ EN 61326-1, ДСТУ EN 61547, ДСТУ EN 61000-6-3:2015, ДСТУ EN 61000-6-4; та випробування на несприйнятливості до

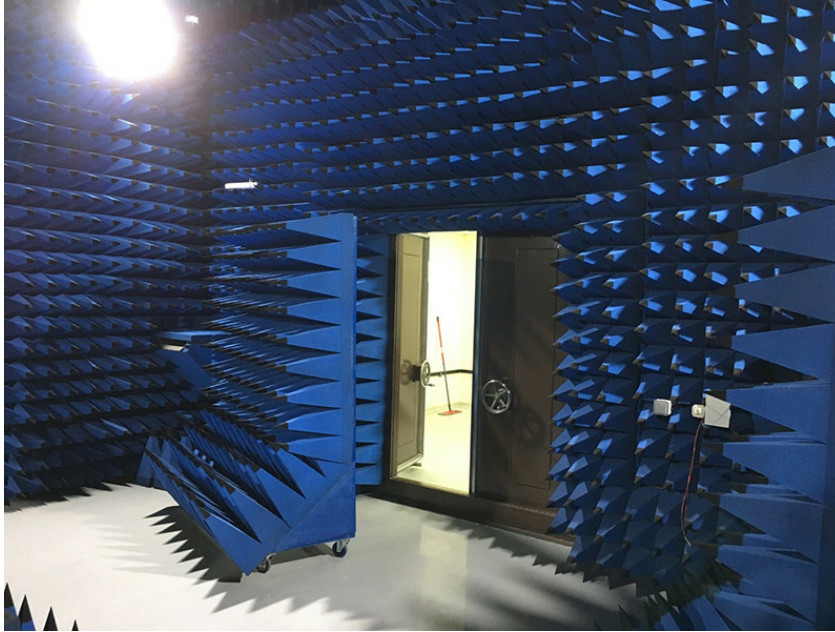


Рис. 5. Камера EMC виробництва компанії Albatross Projects

електромагнітних полів випромінювання ДСТУ EN IEC 61000-4-3, ДСТУ EN 61000-6-1, ДСТУ EN 61000-6-2, ДСТУ EN 61000-4-6 та ін.

Для вимірювання параметрів випромінювання та випробування електромагнітної сприйнятливості електронних приладів і систем обладнано сучасну екрановану камеру EMC (рис. 5) виробництва компанії Albatross Projects, яка відповідає обов'язковим вимогам, що містяться в таких стандартах: STANAG 4370/АЕСТР-250 “Вимоги до електричних та електромагнітних випробувань”, STANAG 4370/АЕСТР-500 “Вплив електромагнітного поля на навколишнє середовище”, EN 50081 “Емісія завад”, EN 50082 “Несприйнятливості до завад”, EN 55011 “Промислове, наукове та медичне обладнання”, EN 55014 “Побутова апаратура”.

У конструкції камери враховано сучасні вимоги та директиви:

- стандарти CISPR (Міжнародний комітет з радіозавад);
- стандарти EN (стандарти Європи);
- стандарти VDE (стандарти Німеччини);
- MIL-STD-285; MIL-STD-461; MIL-STD-462 (військові стандарти);
- NSA 65-6 (стандарти зв'язку);
- FCC OST 55; ANSI C63; стандарти IEC та VG.

Камера EMC забезпечує створення рівномірного електромагнітного поля напруженістю до 30 В/м в області однорідного поля 1,5×1,5 м з вимірювальною відстанню до антени 3 м та використовується для:

- визначення електромагнітної стійкості та сумісності електронних приладів і систем;
- випробування TEMPEST (стандарт НАТО та США) на електромагнітні імпульсні випромінювання для захисту від шпигунства та перехоплення інформації;

– вимірювання діаграм направленості антен, коли потрібно значне згасання сигналу внаслідок екранування камери;

- вимірювання ефективної площі розсіювання/відбиття сигналу;
- вимірювання для стільникового телекомунікаційного зв'язку та мережі Інтернет;
- випромінюваної потужності та характеристик приймачів бездротових приладів;
- вимірювання згідно з вимогами ETSI.

Для випробувань застосовується компактна ЕМП/ЕМС випробувальна система CEMS 130 виробництва компанії Rohde & Schwarz GmbH & Co у складі: генератор сигналів R&S SMB100A; вимірювач потужності R&S NRP2; давач потужності R&S NRP-Z91; підсилювач R&S BBA100; підсилювач R&S BBA150; блок комутації R&S OSP120; приймач R&S ESR7; логоперіодична антена R&S HL562E ULTRALOG; контролер Maturо NCD; ноутбук керування.

Програмне забезпечення системи тестування дозволяє автоматизувати цикл випробувань та формувати електронний звіт із діаграмами та результатами.

Діапазон частот системи випробувань:

- від 80 МГц до 3 ГГц для несприйнятливості до завад;
- від 30 МГц до 6 ГГц для емісії завад.

Антена R&S HL562E ULTRALOG поєднує в собі характеристики біконічної та логоперіодичної антени. За допомогою однієї антени можливо вимірювати електромагнітне випромінювання у надзвичайно широкому діапазоні частот від 30 МГц до 6 ГГц. Оптимізована симетрія та відповідний коефіцієнт стоячої хвилі напруги антени R&S HL562E ULTRALOG дозволяють використовувати її для вимірювань, де потрібна напруженість поля 10 В/м або вище.

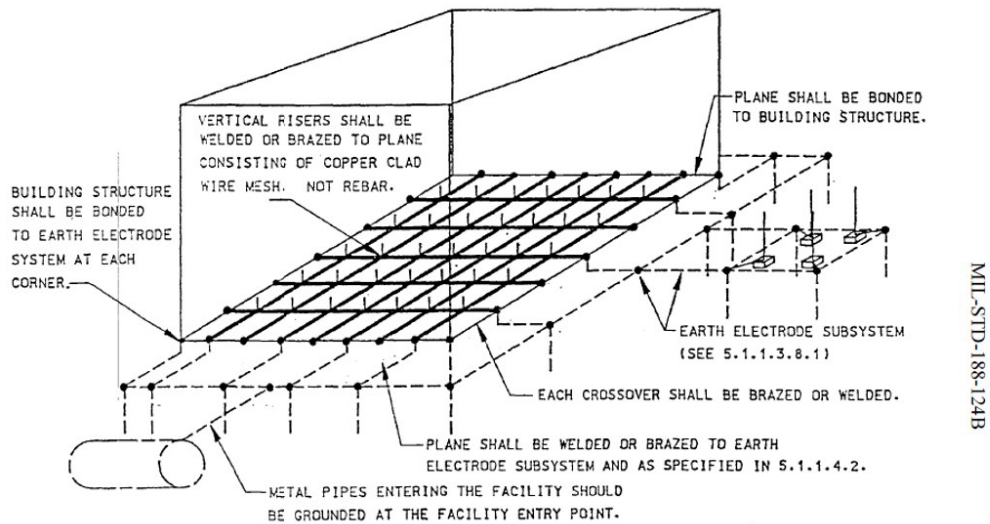


Рис. 6. Приклад виконання ЗП для військового об'єкта згідно зі стандартом MIL-STD-188-124B

5. Теоретико-практичні засади підвищення стійкості до електромагнітного впливу, розроблені в НДПКІ “Молнія”

Ефективними засобами для забезпечення стійкості до електромагнітного впливу природного та штучного походження є системи екранування, заземлення та блискавкозахисту (рис. 6), які слугують для розтікання електричного струму та накопиченого статичного заряду, захисту персоналу від електричних ударів, запобігання загорянню засобів ураження, палива та займистих пар, а також захисту апаратних засобів від пошкодження. Згідно з А.5.2 MIL-STD-461G [6], відповідність має бути перевірено тестами, аналізами, перевітками чи їх комбінацією. Важливим етапом після розробки засобів з випробування є розробка теоретико-практичних засад підвищення стійкості до електромагнітного впливу. Безпосередньо виконання заземлювального пристрою (ЗП) регулює стандарт MIL-STD-188-124B [7]. Окрім того, контроль стану ЗП та вимоги до його виконання, як для військових об'єктів, так і для об'єктів критичної інфраструктури, регламентуються в міжнародних вимогах ІЕС та IEEE std.-80 [8] та std.-81 [9].

НДПКІ “Молнія” було вдосконалено математичні моделі для визначення надійності заземлювального пристрою (ЗП) при дії електромагнітних впливів різного походження (коротке замикання, удари блискавки тощо) при використанні апаратних засобів для контролю цілісності та існуючого розташування систем заземлення, в тому числі об'єктів критичної інфраструктури. Вони відрізняються від відомих моделей одночасним урахуванням комплексу параметрів, а саме: довільного числа підземних і наземних зв'язків систем заземлення, електричних параметрів неоднорідного ґрунту, нееквіпотенціальності системи заземлення; визначенням сумарного опору розтікання досліджуваних систем у різних аварійних режимах з урахуванням перерахованих вище особливостей.

Використання цих моделей знайшло широке впровадження при розробці та модернізації систем заземлення на найбільших генеруючих станціях України та понад 1000 підстанцій 35–750 кВ, що забезпечило їх ефективну, безпечну та безперебійну роботу. На рис. 7 наведено плани підземних і наземних з'єднань двох високовольтних підстанцій та змодельовано розподіли еквіпотенційних ліній на поверхні землі у режимах КЗ.

На основі експериментально-розрахункових досліджень систем заземлення діючих енергооб'єктів проведено статистичний аналіз кількості перевищень припустимих значень нормованих параметрів для діючих 1004 підстанцій. Встановлено, що до виконання модернізації на понад 75% об'єктів критичної інфраструктури України не забезпечено вимог до систем заземлення, а відповідно й вимог щодо електромагнітної стійкості. Забезпечення безперебійної роботи цих об'єктів в умовах цілеспрямованих ударів агресора по енергетичній інфраструктурі пов'язано з питаннями національної

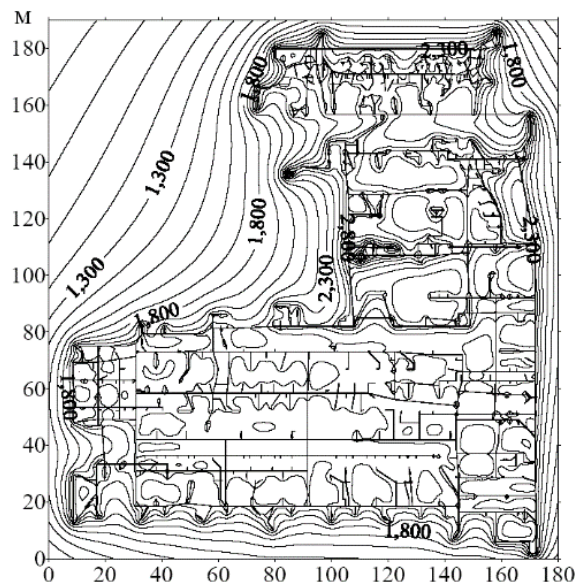


Рис. 7. Розраховані розподіли ліній рівного потенціалу (в кіловольтах) на поверхні землі в режимі короткого замикання

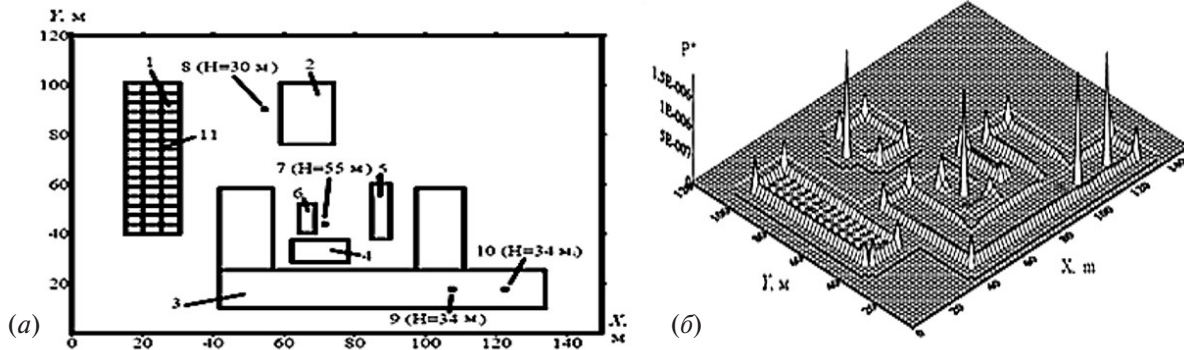


Рис. 8. План високовольтної підстанції (а), розраховані розподіли щільності ймовірності влучання блискавок (б)

безпеки, людськими життями, матеріальними втратами та екологічними ризиками.

Були розроблені статистичні моделі для прогнозування вразливості щодо електромагнітного впливу атмосферних явищ на об'єкти військової та критичної інфраструктури, які, на відміну від існуючих, враховують усі можливі місця появи блискавки, статистичний розподіл її потенціалів, середньорічне число ударів в 1 км² для певної місцевості, виникнення висхідних лідерів від конструкцій, що захищаються, та блискавкоприймачів, їх розташування, габарити і висоту.

На рис. 8 показано план підстанції (а) та розраховані розробленою статистичною моделлю розподіли щільності ймовірності влучання блискавок (б).

Висновки

1. Розроблено та впроваджено комплекс національних еталонів і випробувального обладнання для забезпечення метрологічної простежуваності результатів вимірювань до Міжнародної системи

одиниць (SI) при проведенні випробувань обладнання для об'єктів критичної інфраструктури на електромагнітну стійкість та сумісність за стандартами НАТО.

2. Виконано математичне моделювання та проведено дослідження просторового розподілу електромагнітного поля безлунневих камер при побудові еталона напруженості електромагнітного поля.

3. Впроваджено методи та засоби для калібрування обладнання, що відповідають світовому рівню.

4. Створено систему простежуваних до одиниць SI випробувань відповідно до стандартів з електромагнітної стійкості на основі раніше створених в Україні високовольтних стендів.

5. Розроблено засоби експериментально-розрахункового моделювання електромагнітних полів у неоднорідних складних об'єктах, які дозволяють розробити системи екранування, заземлення та блискавкозахисту для забезпечення їх надійної та безвідмовної роботи в умовах впливу електромагнітних імпульсів природного та штучного походження.

Implementation of NATO standards to improve the electromagnetic immunity and compatibility of equipment of the critical infrastructure objects

P. Neyezhnikov¹, S. Buriakovskiy², O. Vasylieva¹, V. Velychko³, F. Venislavskiy⁴, S. Rudenko²

¹ National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine
pavel.neyezhnikov@metrology.kharkov.ua

² Scientific Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpychova Str., 2, 61002, Kharkiv, Ukraine
sergbyr@i.ua

³ SE "Kharkivstandartmetrology", Myronosytska Str., 36, 61000, Kharkiv, Ukraine
hcsms.12@gmail.com

⁴ Member of Parliament of Ukraine, Hrushevsky Str., 5, 01008, Kyiv, Ukraine
venislavskiy@gmail.com

Abstract

Ensuring that domestic technical equipment meets modern safety and reliability requirements in accordance with NATO standards is a pressing problem in Ukraine. Without metrological support for testing the electromagnetic compatibility and

immunity to powerful electromagnetic fields of natural and artificial origin, it is impossible to ensure reliable and safe use of modern electronic, electroenergetics and electric equipment in critical infrastructure facilities.

The paper presents the metrological traceability paths of the state measurement standards in the field of electromagnetic measurements, established at the NSC “Institute of Metrology”, to the SI units. The results of the research on the measurement standard of the electromagnetic field strength unit in the frequency range from 0.01 MHz to 43 GHz (NDETU EM-05-2021), established at the NSC “Institute of Metrology”, are described. The connection of the NDETU EM-05-2021 measurement standard with the measurement standards of the power unit of electromagnetic oscillations in coaxial and waveguide transmission lines and the standard of AC electric voltage is demonstrated.

The lists of tests in accordance with the AESTR-500 standard, which are supported by the measurement standards of the NSC “Institute of Metrology”, and the equipment that can be calibrated by the national measurement standards are given. The examples of tests for electromagnetic compatibility carried out in the testing centre of the State Enterprise “Kharkivstandartmetrologiya” are provided.

Based on the results of the developed statistical models at the Research and Design Institute “Molniya” for predicting the vulnerability to electromagnetic effects of atmospheric phenomena on critical infrastructure facilities, the examples of the distribution of lines of the equal potential (in kilovolts) on the ground surface in the short circuit mode and the distributions of probability density of lightning strikes are presented. The distributions of the equal potential lines on the ground surface in the short-circuit mode of high-voltage substations are modelled based on calculations.

Keywords: standards; measurement standards; metrological traceability; calibration; testing; electromagnetic compatibility; electromagnetic immunity; critical infrastructure.

Список літератури

1. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1077-2015-%D0%BF#Text>
2. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0030&rid=4>
3. STANAG 4370 AECTP-500:2016. Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification Ed. E Ver. 1, DECEMBER 2016. 1125 p.
4. MIL STD 461G:2015. Department of Defense Interface Standard – Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. 266 p.
5. Vasileva E.M., Makarov O.V., Melnik S.I. Modeling and Creation of a Reference Installation for the Reproduction of the Electromagnetic Field Strength Unit on the Basis of a GTEM – Cell in the Range of Frequency up to 1 GHz. *Proceedings of 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, September 2020. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252732
6. MIL-STD-461G:2015. Department of Defense USA. Interface Standard – Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. 280 p.
7. MIL-STD-188-124B:1992. Department of Defense USA. Grounding, Bonding and Shielding for Common Long Haul/Tactical Communication Systems Including Ground Based Communications-Electronics Facilities and Equipments. 34 p.
8. IEEE Std 80-2013. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (Revision of IEEE Std 80-2000 / Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015). IEEE, 2015. 226 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7109078
9. IEEE Std 81™-2012. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System (Revision of IEEE Std 81-1983). IEEE, 2012. 86 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6392181

References

1. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1077-2015-%D0%BF#Text>
2. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0030&rid=4>
3. STANAG 4370 AECTP-500:2016. Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification Ed. E Ver. 1, DECEMBER 2016. 1125 p.
4. MIL STD 461G:2015. Department of Defense Interface Standard – Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. 266 p.
5. Vasileva E.M., Makarov O.V., Melnik S.I. Modeling and Creation of a Reference Installation for the Reproduction of the Electromagnetic Field Strength Unit on the Basis of a GTEM – Cell in the Range of Frequency up to 1 GHz. *Proceedings of 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, September 2020. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252732
6. MIL-STD-461G:2015. Department of Defense USA. Interface Standard – Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. 280 p.
7. MIL-STD-188-124B:1992. Department of Defense USA. Grounding, Bonding and Shielding for Common Long Haul/Tactical Communication Systems Including Ground Based Communications-Electronics Facilities and Equipments. 34 p.
8. IEEE Std 80-2013. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (Revision of IEEE Std 80-2000 / Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015). IEEE, 2015. 226 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7109078
9. IEEE Std 81™-2012. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System (Revision of IEEE Std 81-1983). IEEE, 2012. 86 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6392181