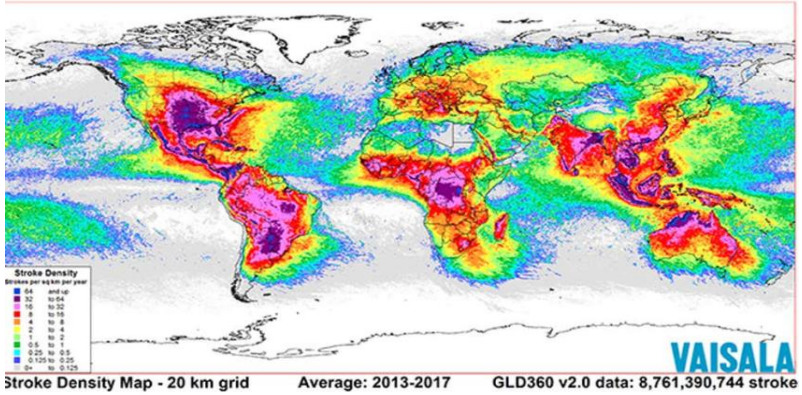
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СТІЙКІСТЬ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

2025

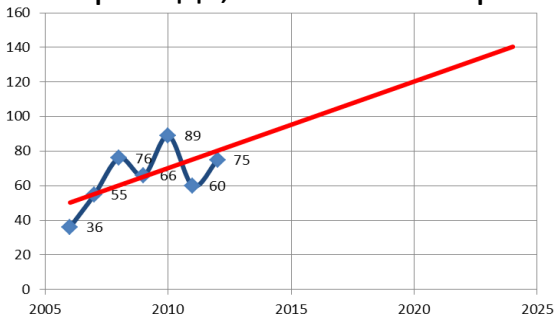
АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ: ПОЯВА БІЛЬШ ПОТУЖНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД

Підвищення блискавкоактивності та її потужності, то ж відповідні потужні електромагнітні завади, що викликані розрядами блискавки, виникають частіше



Грозова активність на планеті згідно даними NASA та фінської екологічної компанії VAISALA постійно збільшується

Джерела електромагнітних завад штучного походження стають більш різноманітними та потужними: новітні зразки електромагнітної зброї та військові засоби електромагнітної протидії, засоби електромагнітного тероризму, електромагнітний імпульс ядерного вибуху.



Кількість вимикань ліній електропередачі 220-750 кВ в Україні внаслідок грозової діяльності по роках експлуатації, (**фактична** та **очікувана**)

Станція радіоелектронного пригнічення 1Л269 (РФ)

Потужні джерела направленої дії на шасі джипу Hummer та БТР Stryker (США)

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ: Критичний стан у надійності та безпеці експлуатації об’єктів інфраструктури України підтверджується низкою аварій внаслідок несправного ЗП та СБЗ

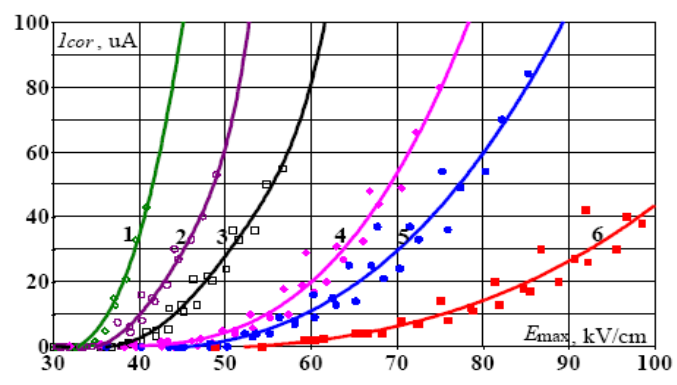
Дата, назва об’єкту	Опис події	Наслідки
30.04.2019 Рівненська АЕС	Коротке замикання (КЗ) з займанням трансформатора 330 кВ з помилковим спрацюванням захисту та відключенням 3-го енергоблоку	**– іміджеві втрати держави;** **– елементи паніки серед населення;** **– втрати держави та НАЕК Енергоатом близько 3 млн грн в день (!) в зв'язку з недовідпуском електроенергії (вартість електроенергії 0,56 коп кВт при середньодобовому виробництві блоку 6 млн кВт/год);** **– непрацездатний силовий трансформатор (декілька млн. дол.).**
2013 р. ПС "Аджалик-330 кВ" ПАТ «НЕК «Укренерго»	Хибне спрацювання релейного захисту з відключенням усіх споживачів	**– збій у технологічному процесі роботи НПС Августівка, низки заводів, та електропостачання населених пунктів (судовий позов до держави на суму близько 20 млн. грн.)**
24.06.2016 ПС "Барабашово-110 кВ" АТ "Харківобленерго"	Коротке замикання (КЗ) на високовольтній кабельній лінії призвело до займання силового трансформатору 110 кВ	**– непрацездатний силовий трансформатор (вартість 1 млн. дол.);** **– декілька годин не працював наземний електротранспорт;** **– збій в роботі підземного електротранспорту (різке зупинення ескалаторів, освітлення тощо);** **– відсутнє електропостачання в залюднених громадських місцях (ТРЦ, житлові будинки тощо).**
07.06.2018 ПС "Кримська-110 кВ" Одесаобленерго"	КЗ силового трансформатора і його подальше займання.	**– непрацездатний силовий трансформатор (вартість 1 млн. дол.);** **– відключення 75% абонентів Суворівського району Одеси (200 тис. людей) у тому числі лікарні та громадські заклади;** **– відключення 123 ТП.**
05.04.2018 Придніпровська ТЕС, м. Дніпро	Займання ТС-330 кВ та відключення трьох повітряних ліній 330 кВ	**– пошкоджене дороговартісне високовольтне обладнання;** **– збій у роботі енергосистеми;** **– збій в роботі металургійного заводу "Дніпросталь" внаслідок відключення кабельної лінії 330 кВ;**
12.10.2014 тягова ПС-110 кВ Шевченківскьої дистанції в м. Сміла Черкаської обл.	КЗ силового трансформатора і його подальше займання.	**– непрацездатний силовий трансформатор (вартість близько 1 млн. дол.);** **– знеструмлення чотирьох районів Черкаської області;** **– збій в роботі залізничного транспорту.**
13.12.2017 ПС-110 кВ "Шпаковка-тягова" Південна залізниця	**КЗ на шинах ПС і подальше займання силових шкафів**	**– пошкоджене дороговартісне високовольтне обладнання;** **– знеструмлено 4 населених пункти;** **– збій у роботі залізничного транспорту на декілька годин.**

МЕТА РОБОТИ

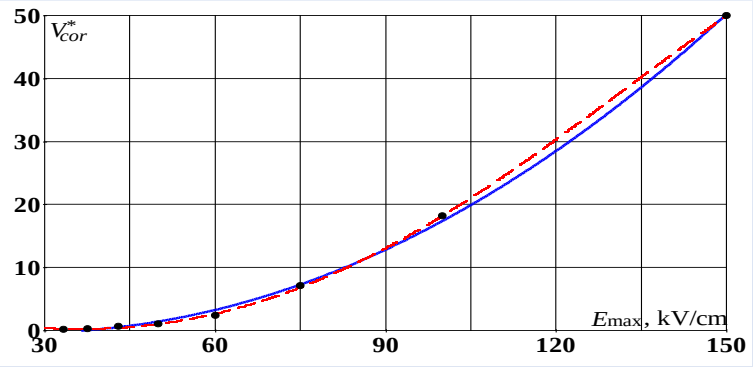
Створення комплексу заходів, який складається з методів статистичного та математичного моделювання, програм випробувань та імітаторів електромагнітних полів природного і штучного походження зі спеціальними амплітудно-часовими параметрами, спрямованого на забезпечення електромагнітної стійкості об'єктів критичної інфраструктури та військових об'єктів до дії потужних електромагнітних впливів при впровадженні їх випробувань за сучасними стандартами, включаючи стандарти НАТО.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень ***вирішена*** **важлива наукова та науково-технічна проблема створення комплексу науково обґрунтованих методів та засобів випробувань об'єктів критичної інфраструктури і нових та вдосконалених зразків військової техніки, стійких до дії потужних електромагнітних впливів**. Для цього розроблені наукові основи фізичного, математичного та статистичного моделювання електрофізичних процесів в елементах об'єктів, що розглядаються, в умовах впливів потужних імпульсних електромагнітних завад штучного та природного походження.

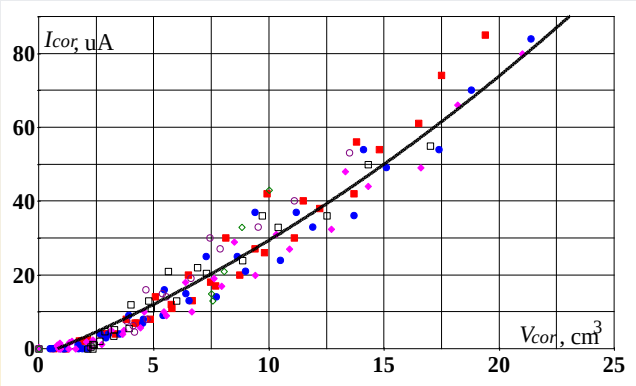
РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО ТА ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ СТРУМУ КОРОНИ (I_{COR}) ВІД ЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ВЕРХІВКАХ БЛИСКАВКОВІДВОДІВ (E_{MAX}) ДЛЯ РІЗНИХ РАДІУСІВ КРИВИЗНИ (R) ЇХ ВЕРШИН



Експериментальні залежності струму корони від максимальної напруженості ЕП на вершинах заземлених стрижнів для різних R
(1 – 0,019 м; 2 – 0,015 м; 3 – 0,0125 м; 4 – 0,009 м; 5 – 0,00775 м; 6 – 0,0055 м)



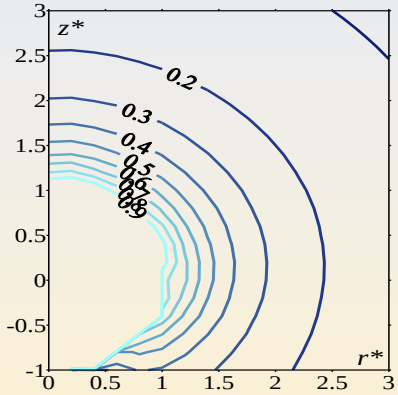
Розрахована залежність V^*_{cor} (об'єму зони коронування) від величини E_{max} (точки відповідають розрахованим значенням, суцільна лінія – апроксимація поліномом)



Розрахунково-експериментальна залежність струму корони від об'єму зони коронування

$$I_{cor} = 0.0652 \cdot V_{cor}^2 + 2.49\, V_{cor} - 2.075$$

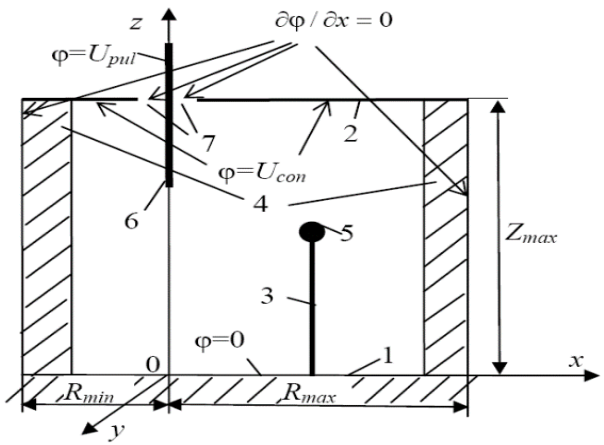
I_{cor}(мкА), V_{cor} (см³)



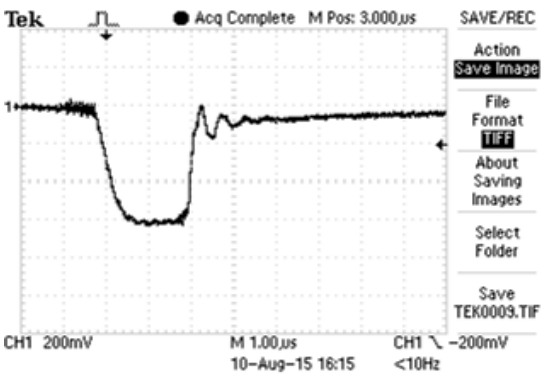
Розрахована залежність напруженості електричного поля в околі вершини електроду

ФІЗИЧНЕ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ПЕРЕДУЮТЬ ВИСОКОВОЛЬТНИМ РОЗРЯДАМ

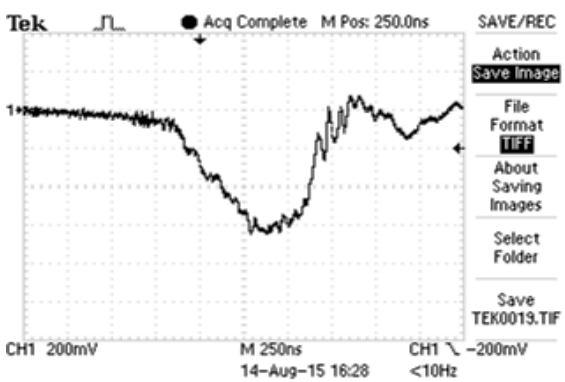
Проведені експериментальні дослідження процесів пробою при наявності коронного розряду на вершинах заземлених стрижнів.



Розрахункова система для моделювання процесів пробою між високовольтним і заземленим електродами системи

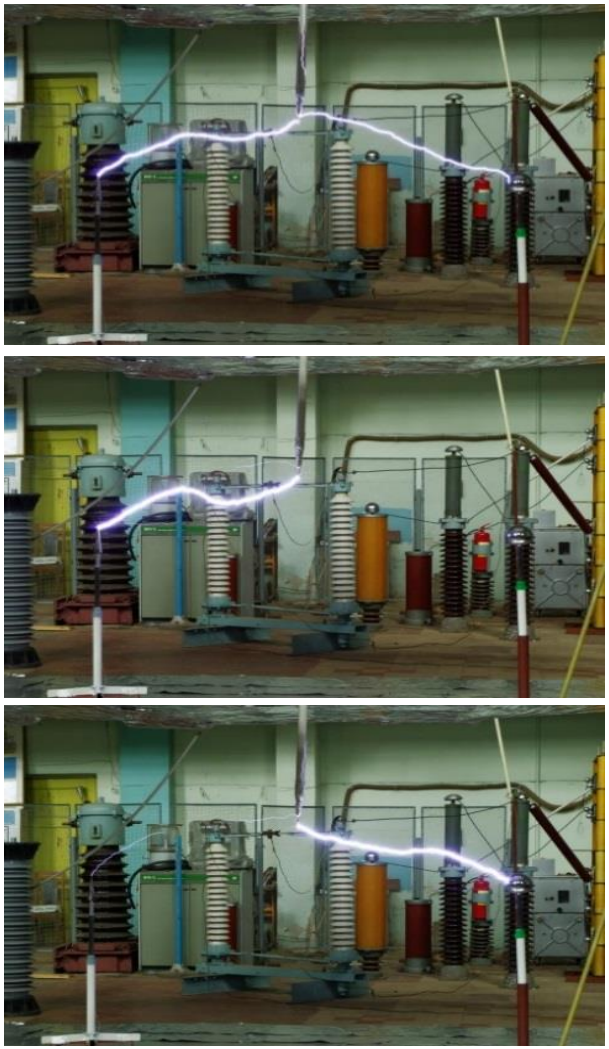


а)



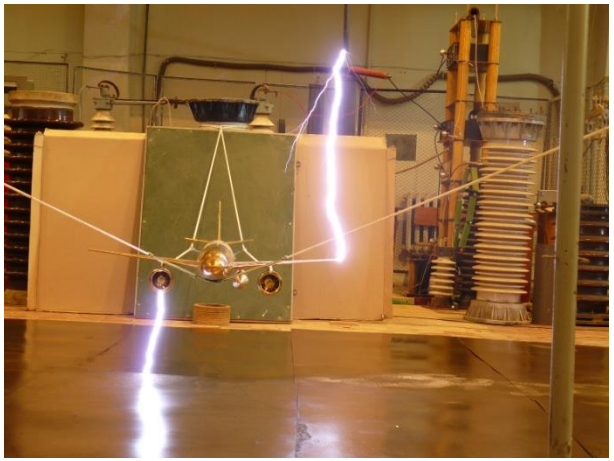
б)

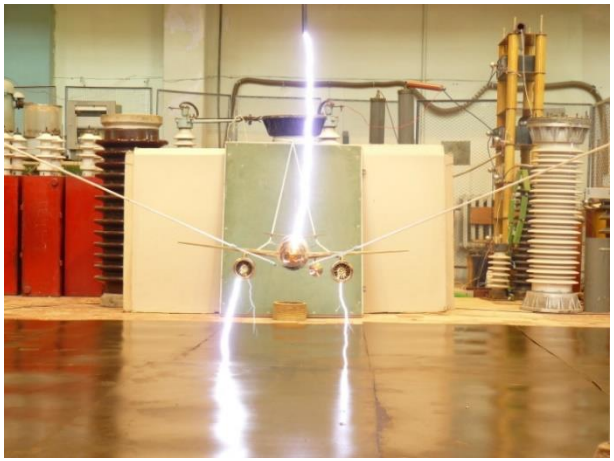
Типові осцилограми при розряді з високовольтного електрода на заземлюючий стрижневий електрод при відстані між ними d та прикладеній напрузі U: а) розряд на фронті прикладеного імпульсу (d=0,44 м, U=0,84 МВ); б) розряд на спаді прикладеного імпульсу (d=1 м, U=1,08 МВ)

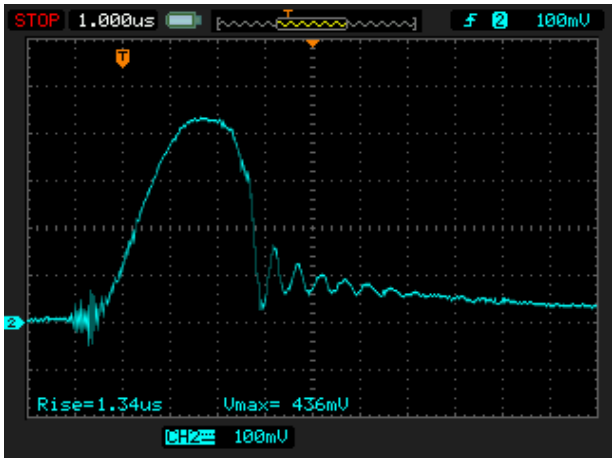


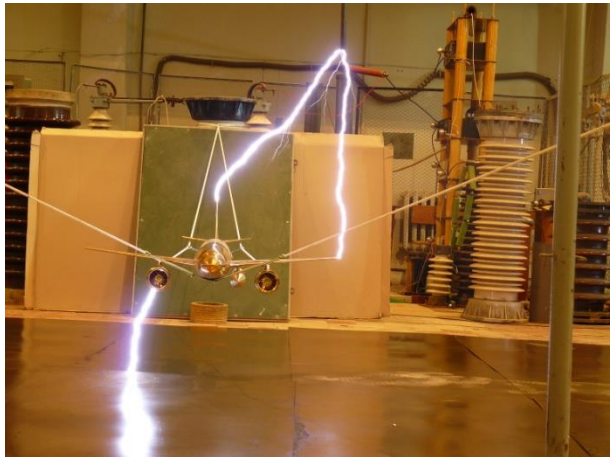
Фізичне для моделювання процесів пробою

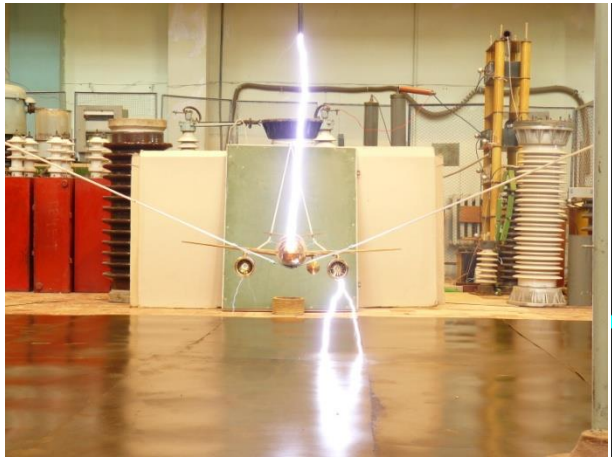
ФІЗИЧНЕ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ПЕРЕДУЮТЬ ВИСОКОВОЛЬТНИМ РОЗРЯДАМ

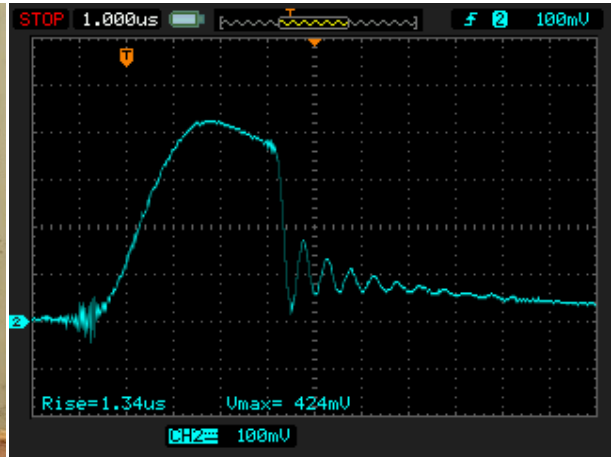










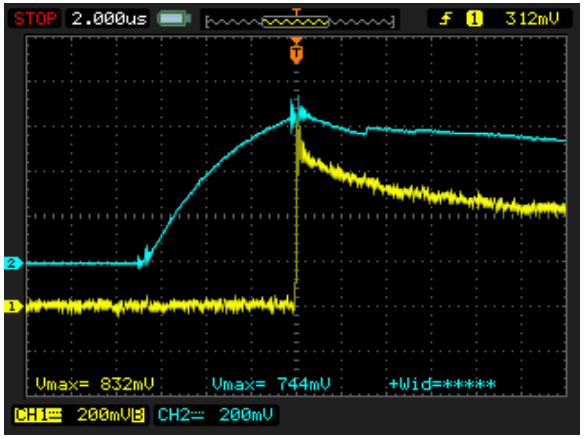


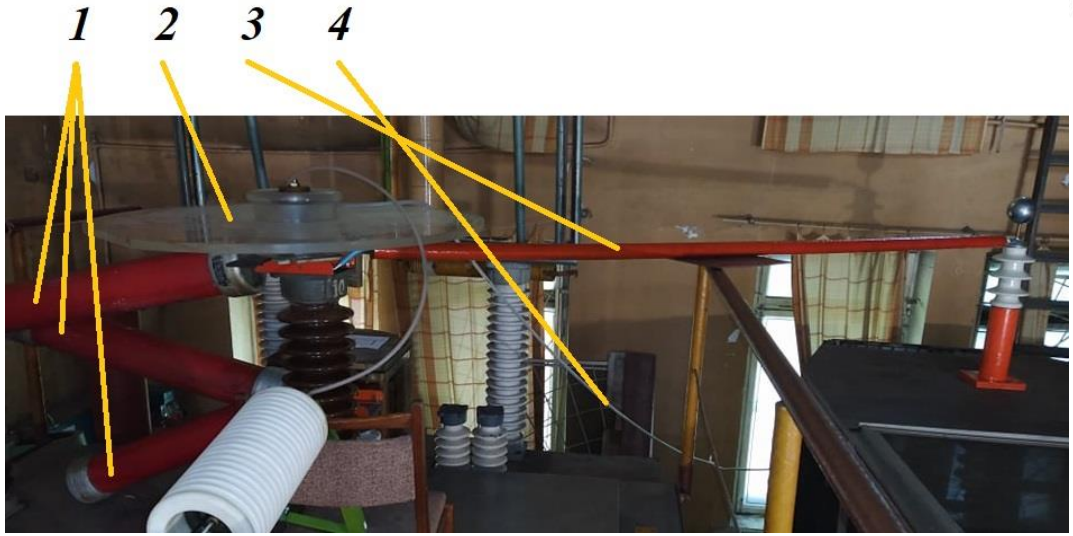
Фізичне дослідження електромагнітних впливів на моделі літаків

Типові осцилограми при розряді з високовольтного електрода на модель літака (d=1 м, U=1,08 МВ)

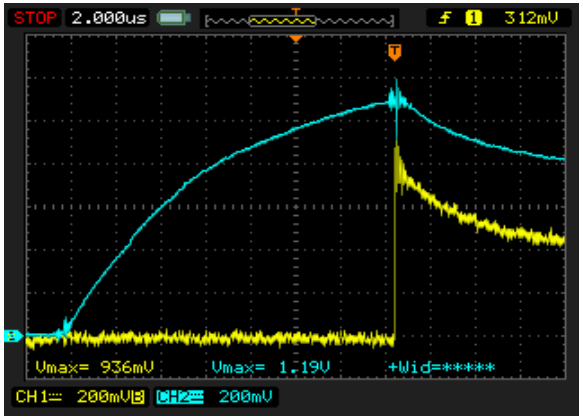
РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ІМІТАЦІЇ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ІМПУЛЬСІВ

Принципова електрична схема експериментального зразка високовольтного джерела імпульсних напруг



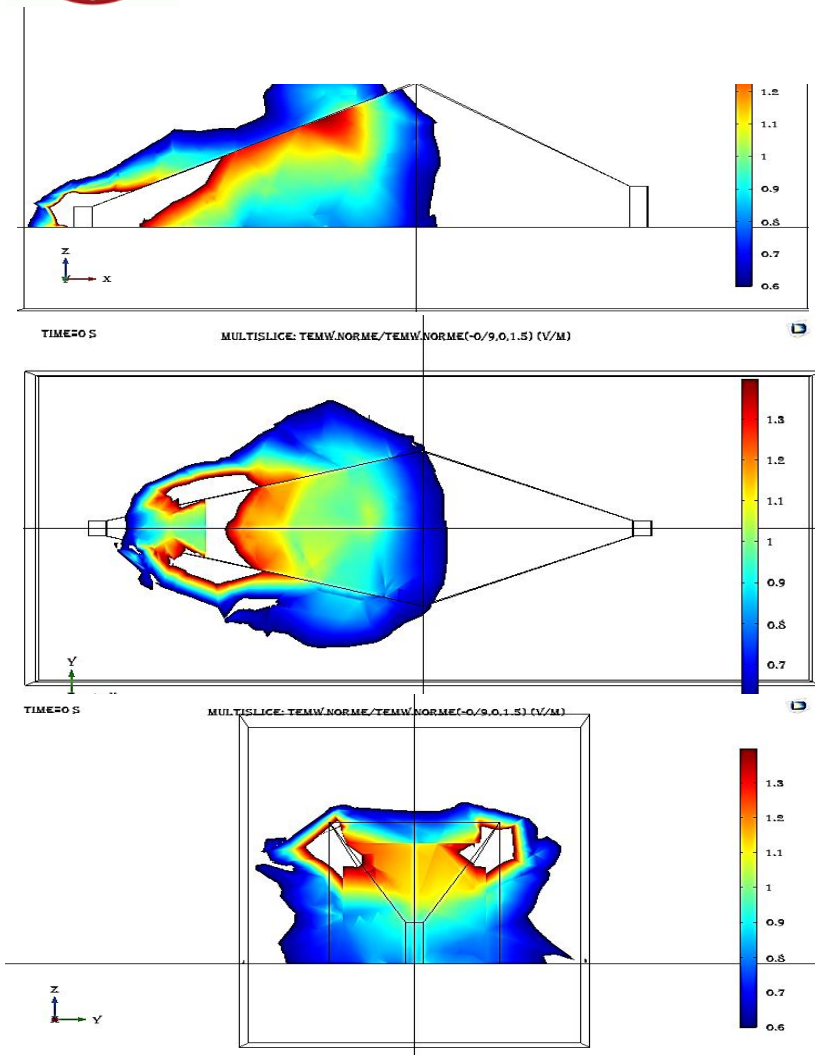


Зовнішній вигляд експериментального зразка високовольтного формуючого пристрою: 1 – ємнісний накопичувач енергії ;2 - газонаповнений розрядник високого тиску ; 3 - високовольтний модуль зарядних резисторів ; 4 - армований шланг високого тиску

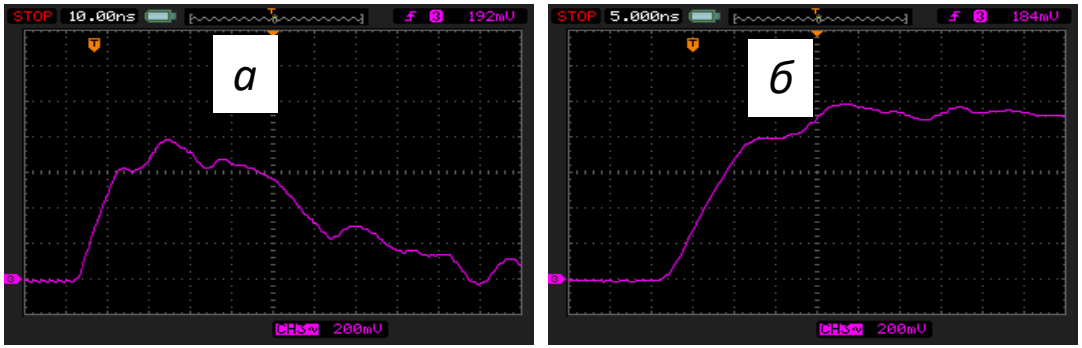


Осцилограми вихідної напруги: формуючий пристрій (жовтий) та малоіндуктивний ємнісний накопичувач (блакитний)

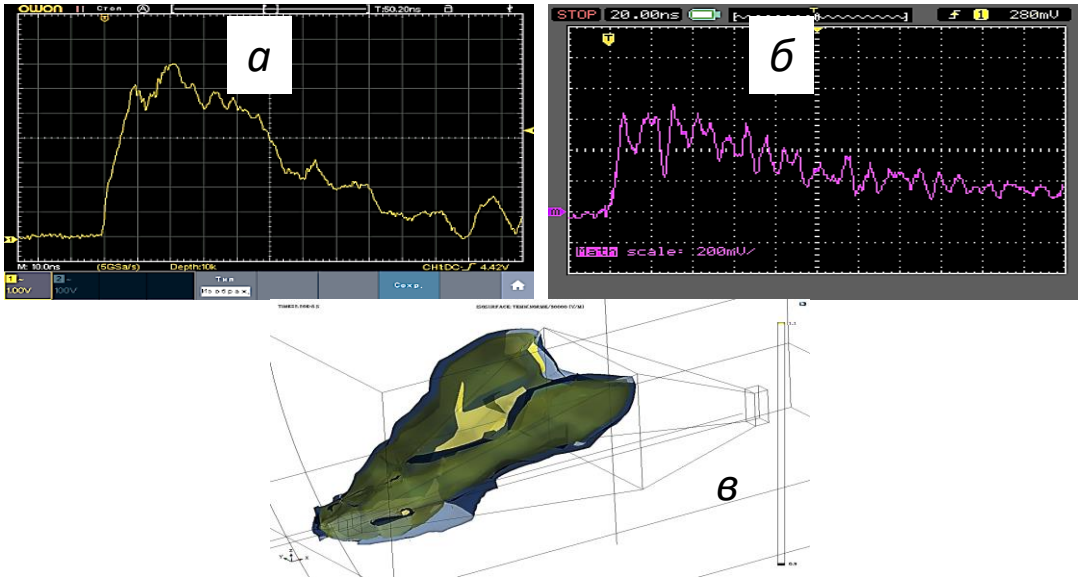
РОБОТА КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ІМІТАЦІЇ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ІМПУЛЬСІВ



Загальна картина розподілу напруженості амплітуди електричного поля відносно його максимального значення у центральній точці системи у трьох перерізах

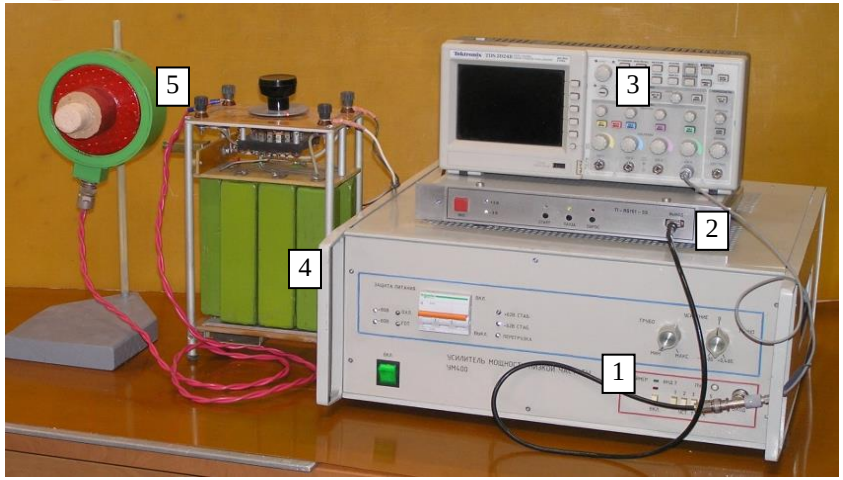


Осцилограми напруженості електричного поля ЕМІ висотного ядерного вибуху за допомогою експериментального зразка випробувального комплексу (а) та фронтова частина імпульсу (б)

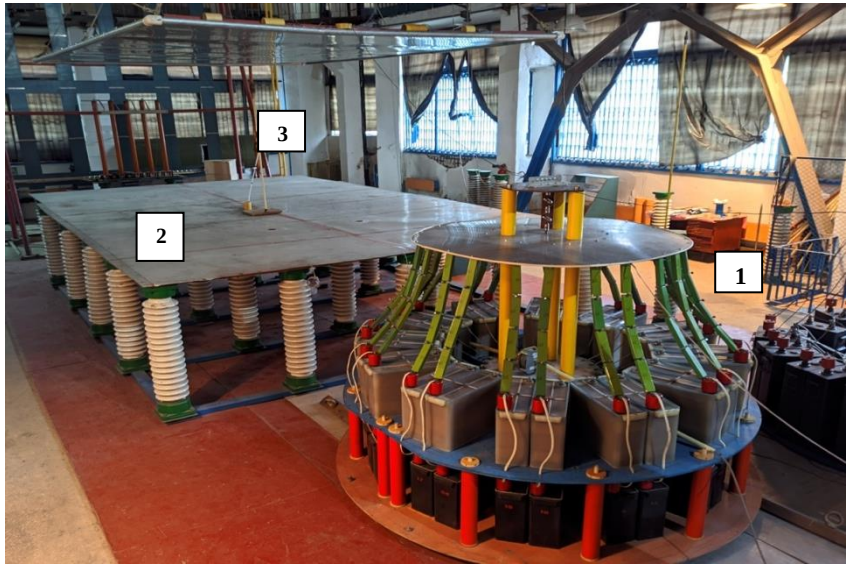


Осцилограми імітації електромагнітного імпульсу з фронтом τф = 7 нс та тривалістю τи = 50 нс (10 нс/под.,): а – E(t), 7,4 (кВ/м)/под.,; б – H(t), 8,33×10^2 (А/м)/под.) та в – ізоповерхні однорідності поля в робочому об’ємі

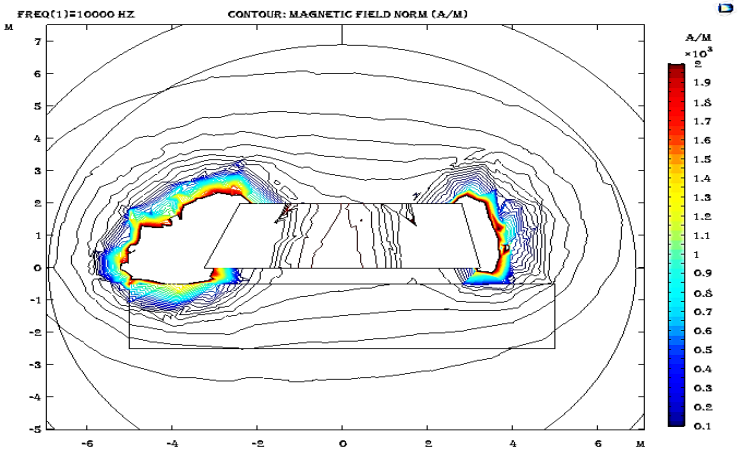
РОЗРОБКА ТА СТВОРЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ ВИПРОБУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК СТАНДАРТУ АЕСТР 500:2016

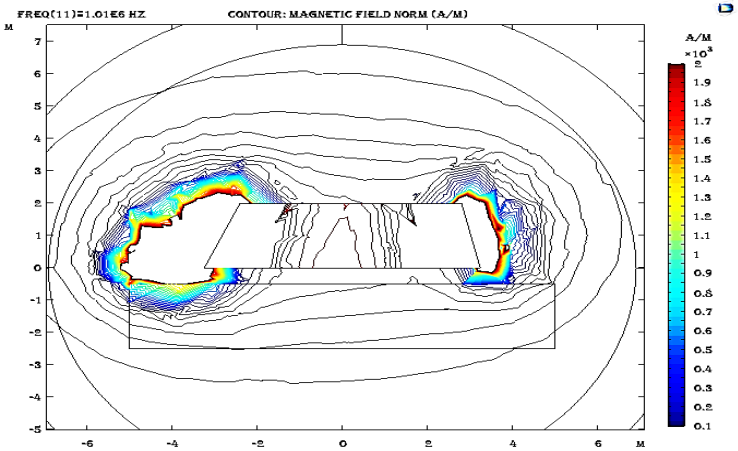


Зовнішній вигляд випробувальної установки TI–NRS01
1 – підсилювач потужності; 2 – генератор випробувальних струмів; 3 – осцилограф; 4 – узгоджувальне навантаження ; 5 – петля випромінювання



Зовнішній вид випробувального стенду NL254–H–2:
1 – генератор імпульсних струмів; 2 – полеутворююча система; 3 – датчик магнітного поля ИНМП–2–М

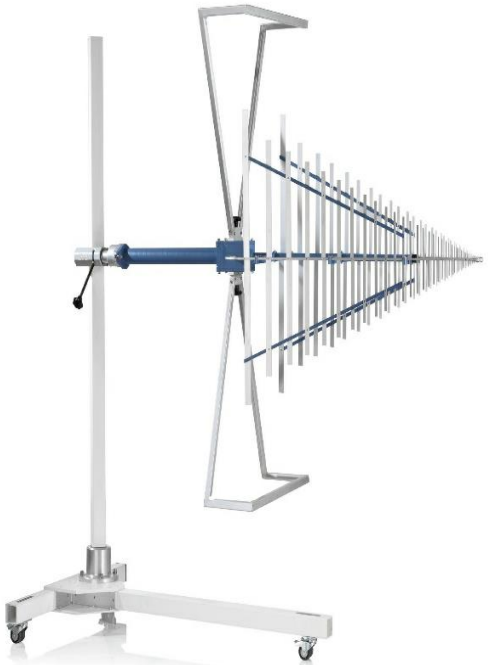




Розподіл напруженості магнітного поля на границях смуги частот 0.01–1МГц при однаковій амплітуді струму

ДП «ХАРКІВСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ

Базовий стандарт	Опис випробувань
IEC 61000-4-2	Електростатичний розряд
IEC 61000-4-3	Електромагнітне поле радіочастотного діапазону
IEC 61000-4-4	Швидкий перехідний процес/пакет
IEC 61000-4-5	Сплески напруги
IEC 61000-4-6	Кондуктивні збурення від РЧ полів
IEC 61000-4-8	Магнітне поле 50 Гц
IEC 61000-4-9	Імпульсне магнітне поле
IEC 61000-4-10	Коливальне магнітне поле
IEC 61000-4-11	Провали напруги та переривання
IEC 61000-4-12	Коливальні хвилі «хвиля дзенькоту» Коливальні хвилі 1 МГц
IEC 61000-4-13	Гармоніки, інтергармоніки у мережі електроживлення
IEC 61000-4-14	Флуктації напруги
IEC 61000-4-16	Кондуктивні збурення у діапазоні частот від 0 до 150 кГц
IEC 61000-4-17	Пульсації живлення постійним струмом
IEC 61000-4-28	Зміни частоти електромережі
IEC 61000-4-29	Провали напруги, переривання та зміни напруги на порту живлення постійного струму



Компактна ЕМП/EMC випробувальна система CEMS 130 (Rohde & Schwarz GmbH & Co), що дозволила реалізувати випробування в діапазоні частот від 30 МГц до 6 ГГц у складі:

-генератор сигналів R&S SMB100A;
- вимірювач потужності R&S NRP2;
- підсилювач R&S BBA100;
- підсилювач R&S BBA150;
- блок комутації R&S OSP120;
- логоперіодична антена R&S HL562E ULTRALOG

СТУПІНЬ РЕАЛІЗАЦІЇ ВИПРОБУВАНЬ В НДПКІ «МОЛНІЯ» НТУ «ХПІ» ЗА СТАНДАРТОМ НАТО STANAG 4370

ЗАСТОСУВАННЯ ВИМОГ STANAG 4370 AECTP 500:2009 (на теперішній час)

Обладнання та підсистеми, встановлені на таких платформах	ЗАСТОСУВАННЯ																							
	NCE01	NCE02	NCE03	NCE04	NCE05	NCS01	NCS02	NCS03	NCS04	NCS05	NCS06	NCS07	NCS08	NCS09	NCS10*	NCS11*	NCS12	NCS13	NRE01	NRE02	NRE03	NRS01	NRS02	NRS03	NRS04
Сухопутні	–	Y	P	Y	Y	Y	Y	P	P	P	–	Y	Y	Y	–	–	Y	–	Y	Y	P	Y	Y	P	–
Морські	P	Y	P	Y	Y	Y	Y	P	P	P	–	Y	P	Y	–	Y	P	–	Y	Y	P	Y	Y	P	Y
Підводні човни	Y	Y	P	Y	Y	Y	Y	P	P	P	P	Y	P	Y	–	Y	P	Y	Y	Y	P	Y	Y	P	Y
Повітряні	Y	Y	P	Y	Y	Y	Y	P	P	P	–	Y	Y	Y	Y	–	Y	–	Y	Y	P	Y	Y	P	–
Космічні системи та стартові комплекси	–	Y	P	–	–	Y		P	P	P	–	Y	Y	Y	–	–	–	–	–	Y	P	–	Y	–	–

Примітки:

Y – Випробування обов’язкові для всього обладнання на цьому типі платформи.

P – Випробування частково застосовується. Вибір виду випробувань має базуватися на інформації про інсталяцію та інше обладнання, яке розташовано поблизу. Ці випробування може також визначити Замовник.

Жовтий – види випробувань, які реалізуються в НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ».

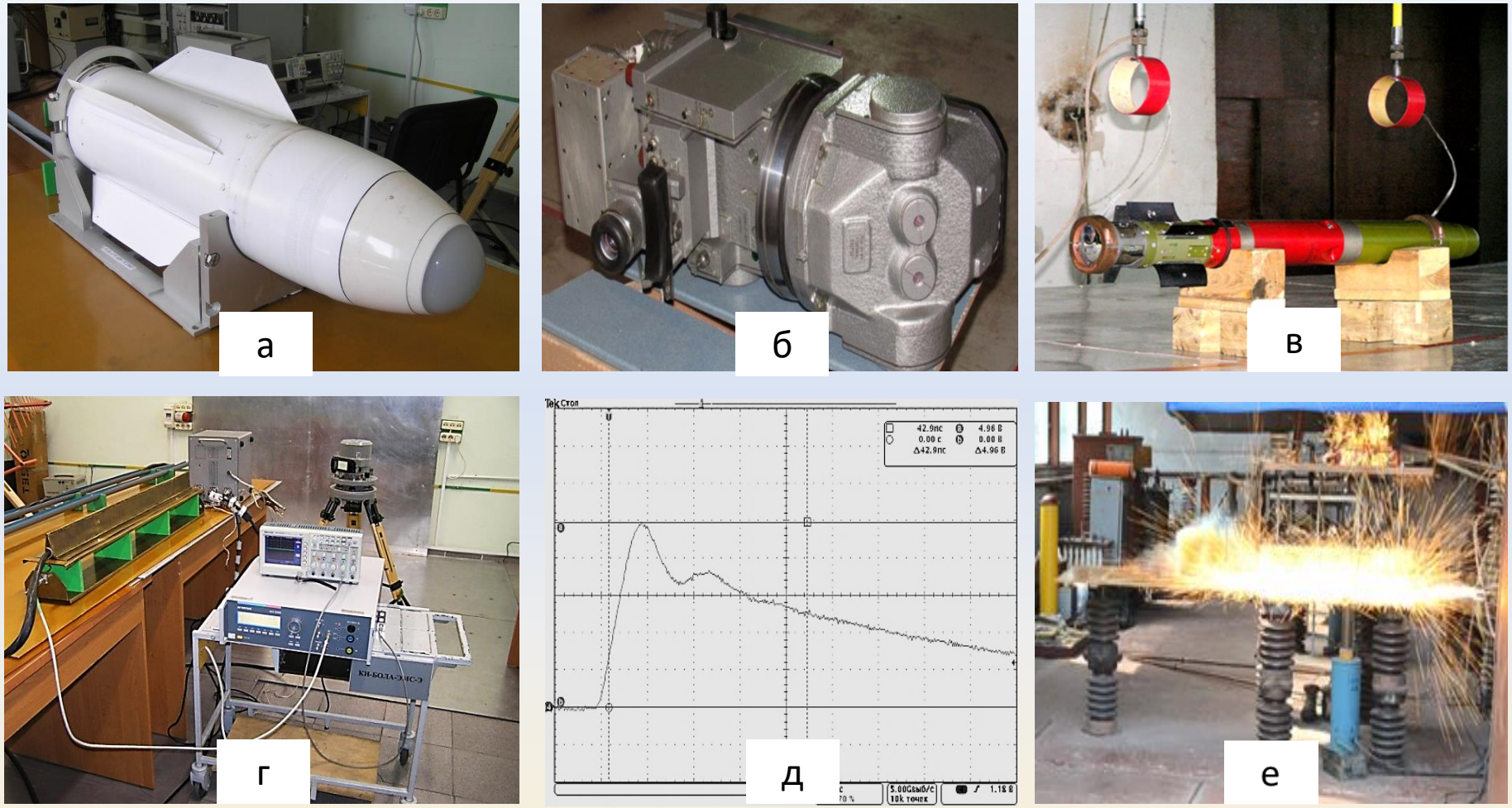
Синій – важливій вид, який частково реалізовано. Для повної реалізації потребує суттєвих витрат.

СТУПІНЬ РЕАЛІЗАЦІЇ ВИПРОБУВАНЬ В НДПКІ «МОЛНІЯ» НТУ «ХПІ» ЗА СТАНДАРТОМ ДСТУ-П STANAG 4370:2017

Номер за АЕСТР 500	Вид випробування	Аналог	Ступень реалізації в НДПКІ "Молнія"
NCE01	Визначення рівня кондуктивних завад від обладнання у мережі електричного живлення у діапазоні частот від 30 Гц до 10 кГц	Mil Std 461	У розробці *1
NCE02	Визначення рівня кондуктивних завад від обладнання у мережі електричного живлення у діапазоні частот від 10 кГц to 10 МГц	Mil Std 461	Реалізовано
NCE04	Визначення рівня кондуктивних завад від обладнання у мережі електричного живлення, за перехідних процесів	Def Stan 59-411	Реалізовано
NCE05	Визначення рівня кондуктивних завад від обладнання у контрольних та сигнальних мережах у діапазоні частот від 30 Гц до 150 МГц	Def Stan 59-411	У розробці *1
NCS01	Несприйнятливість портів електричного живлення обладнання до змінної напруги у діапазоні частот від 30 Гц до 150 кГц	Mil Std 461	Реалізовано
NCS02	Несприйнятливість контрольних та сигнальних портів обладнання до струму у частотному діапазоні від 20 Гц до 50 кГц	Def Stan 59-411	У розробці *1
NCS07	Несприйнятливість портів обладнання (за кабельної інжекції) до струму у частотному діапазоні від 10 кГц до 200 МГц	Mil Std 461	Реалізовано
NCS08	Несприйнятливість портів обладнання до імпульсної завади 2/30/2 нс за кабельної інжекції	Mil Std 461	Реалізовано *2
NCS09	Несприйнятливість портів обладнання до загасаючого коливального струму з частотою коливань у діапазоні від 10 кГц до 100 МГц	Mil Std 461	Реалізовано *2
NCS10	Несприйнятливість портів обладнання до перехідних процесів викликаних блискавкою	Def Stan 59-411	Реалізовано *2
NCS12	Несприйнятливість обладнання до електростатичного розряду	Def Stan 59-411	Реалізовано
NRE01	Визначення рівня емісії магнітного поля у діапазоні 30 Гц до 100 кГц	Mil Std 461	Реалізовано
NRE02	Визначення рівня емісії електричного поля у діапазоні 10кГц до 18 ГГц	Mil Std 461	Реалізовано *3
NRS01	Несприйнятливість обладнання до магнітного поля у діапазоні частот від 30 Гц до 100 кГц	Mil Std 461	У розробці *1
NRS02	Несприйнятливість обладнання до електричного поля у діапазоні частот від 50 кГц до 40 ГГц	Mil Std 461	Частково *4
NRS03	Несприйнятливість обладнання до імпульсного електромагнітного поля ядерного вибуху (формою 2,0/23 нс)	Mil Std 461	Реалізовано *2 для габаритів до 0,25 м

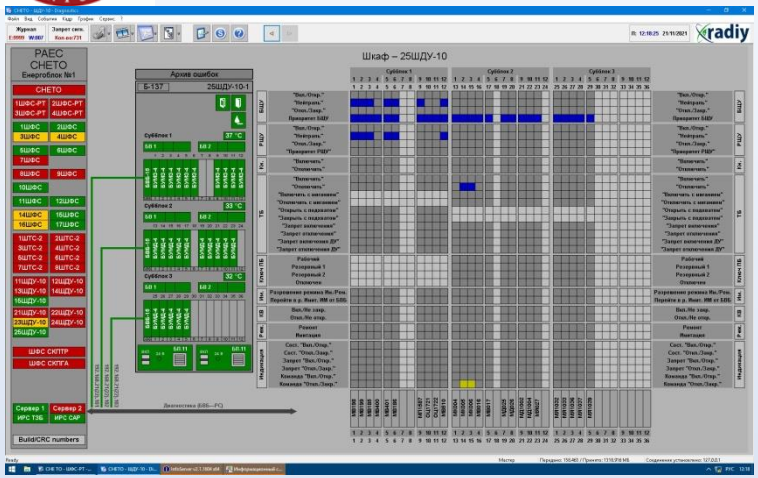
Примітки: 1. Реалізується у рамках проекту, що фінансується Міносвіти і науки України у 2019-2020 роках.
2. Реалізовано у рамках проекту, який фінансовано з джерел Міносвіти і науки України у 2017-2018 роках.
3. Реалізується сумісно з ННЦ «Інститут метрології» із залученням вимірювального приймача.
4. Реалізація можлива лише за спеціальною програмою.

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ В НДПКІ «МОЛНІЯ» НТУ «ХПІ» СТАНДАРТІВ ЄС та НАТО з ЕМС

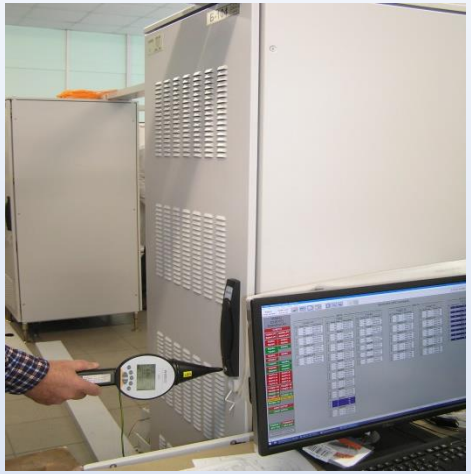


Випробування оптичної головки самонаведення (а), танкового тепловізійного комплексу (б), протитанкового ракетного комплексу (в), приладу огляду (г) за видами CS115 MIL-STD-461E при дії наносекундних імпульсів амплітудою 1 кВ (д) та лопать рульового гвинта на дію прямого удару блискавки (е)

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ В НДПКІ «МОЛНІЯ» НТУ «ХПІ» СТАНДАРТІВ ЄС та НАТО з ЕМС



Кадр контролю за станом шафи для однії з АЕС при випробуваннях на ЕМС



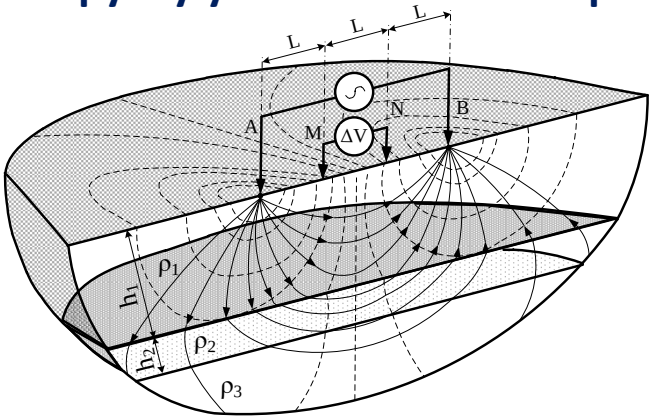
Точки дії електростатичних розрядів

Дія радіочастотного ЕМ випромінення в діапазоні частот:
-80-1000 МГц; -1400-2000 МГц

Дія кондуктивних завад, індукованих радіочастотними ЕМП 150 кГц-80 МГц

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ ТА НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ КРИТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ІНФРАСТРУКТУРИ

Картина поля при зондуванні ґрунту установкою Веннера

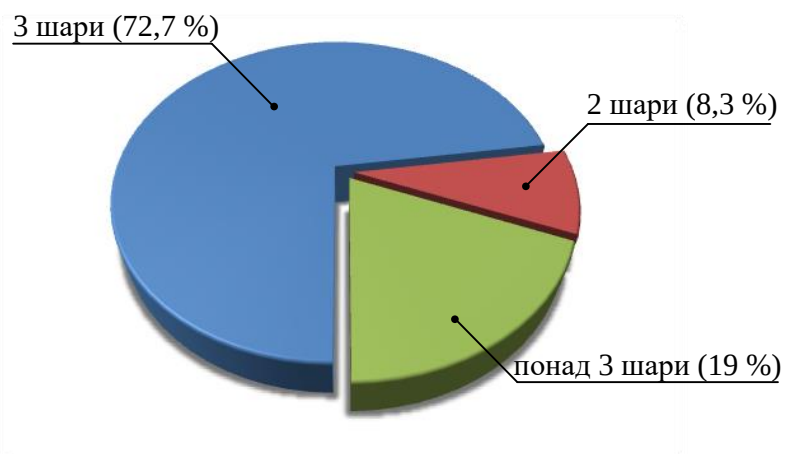


Статистичні характеристики ґрунтів України

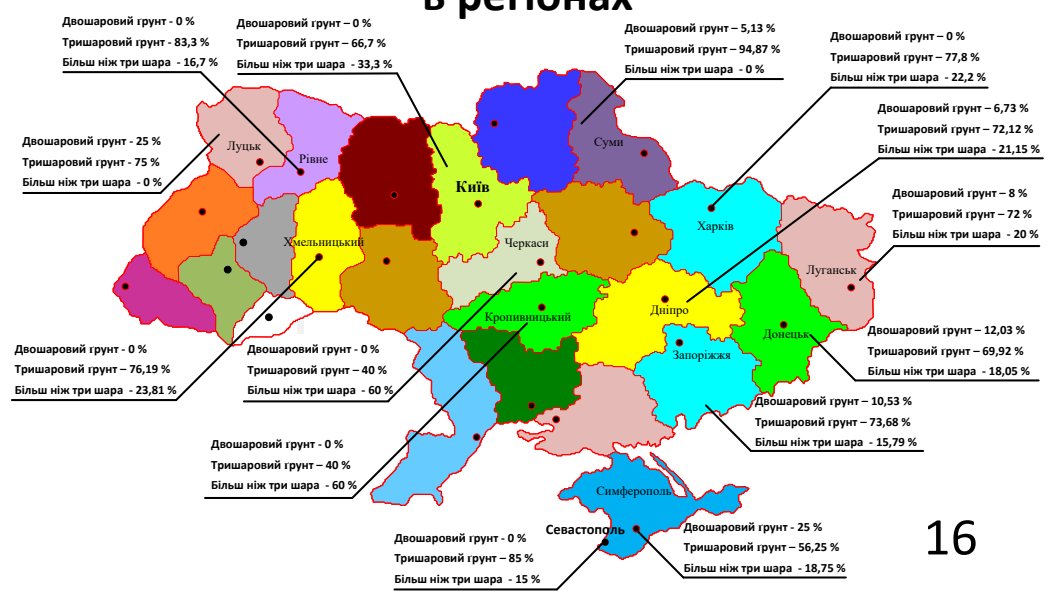
	ПЕО шару ρ_i, Ом·м			Товщина шару		Співвідношення ПЕО ρ_i/ρ_{j+1}		
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	h_1, м	h_2, м	ρ_1/ρ_2	ρ_2/ρ_3	ρ_1/ρ_3
Середнє	183,9	136,93	67,63	0,79	5,46	5,12	6,03	12,11
Медіана	75	29	18	0,45	4	2,75	2,29	4,31
Мода	200	15	30	0,2	10	5	0,5	2
Мінимум	3,0	1,2	**0,3**	0,02	0,01	0,017	0,004	0,018
Максимум	8700	7000	**9000**	10	35	83,3	416,7	625
Вибірка	612	612	592	612	592	612	592	592

Кількість шарів ґрунту в місцях розташування діючих енергооб'єктів:

в цілому по Україні



в регіонах



РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ ТА НАДІЙНОСТІ РОБОТИ КРИТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Статистичний аналіз виконано для:

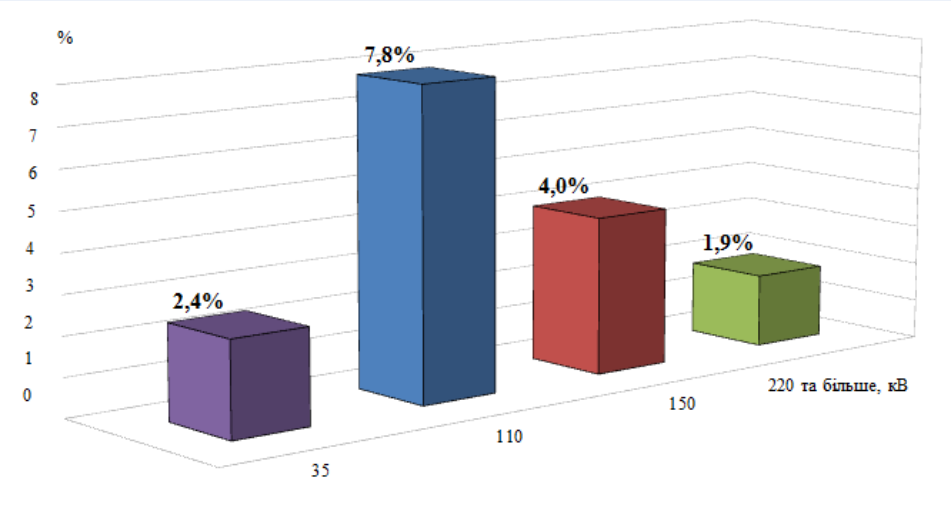
5 АЕС

15 ТЕС

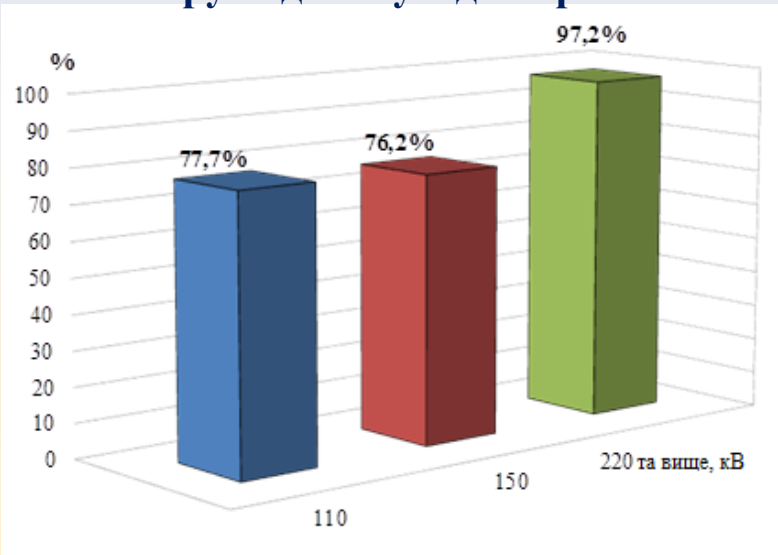
5 ГЕС

1200 підстанцій класом напруги 35-750 кВ

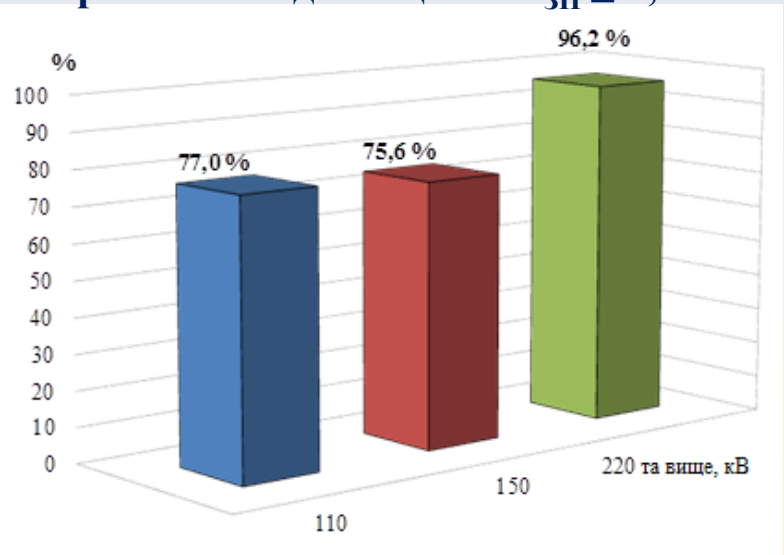
Відсоткова кількість перевищень опору ЗП ($R_{ЗП}$)



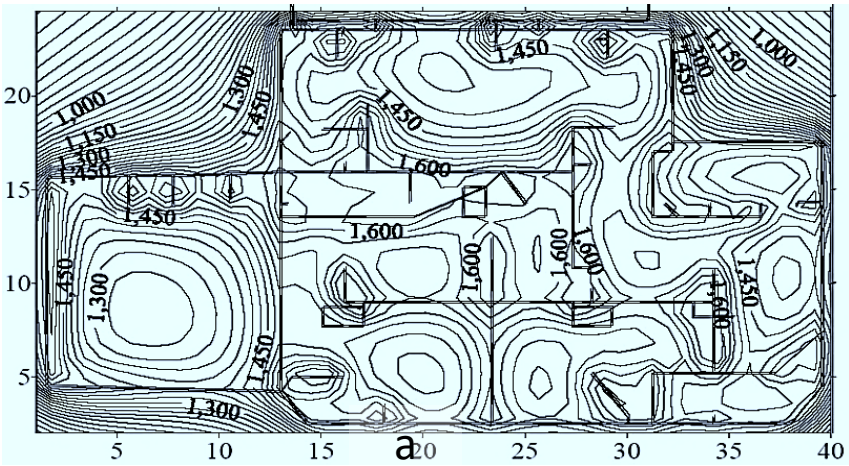
Відсоткова кількість перевищень напруги дотику *U*дот при КЗ

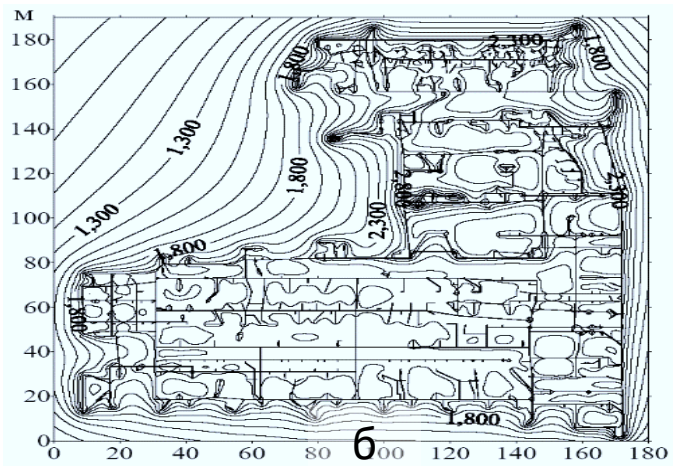


Відсоткова кількість перевищень $U_{дот}$ при КЗ на підстанції та $R_{ЗП} \leq 0,5$ Ом



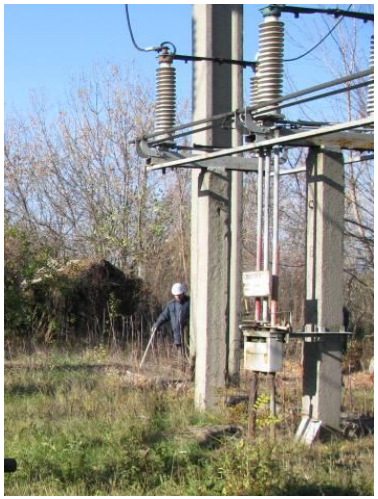
ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ ПРИРОДНЬОГО ТА ШТУЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ





Розраховані розподіли ліній рівного потенціалу (в кіловольтах) на поверхні землі в режимі короткого замикання. а – підстанція "Розівка"; б – підстанція "Кіровоградська"

ПС-110 кВ (м. Авдіївка)

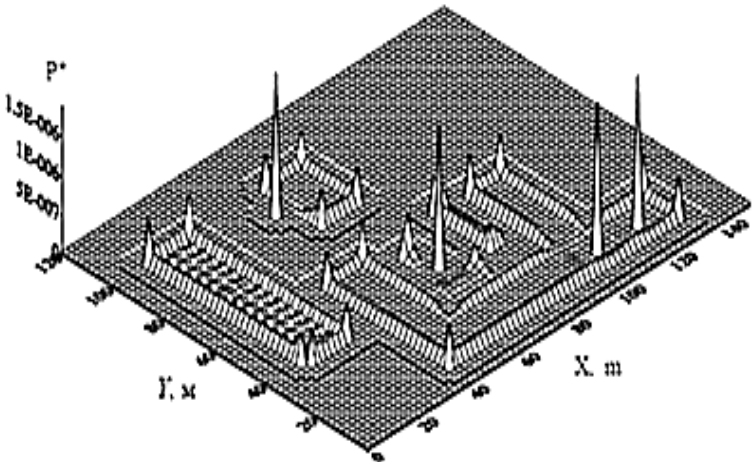


ПС-35 кВ (н.п. Талаківка)

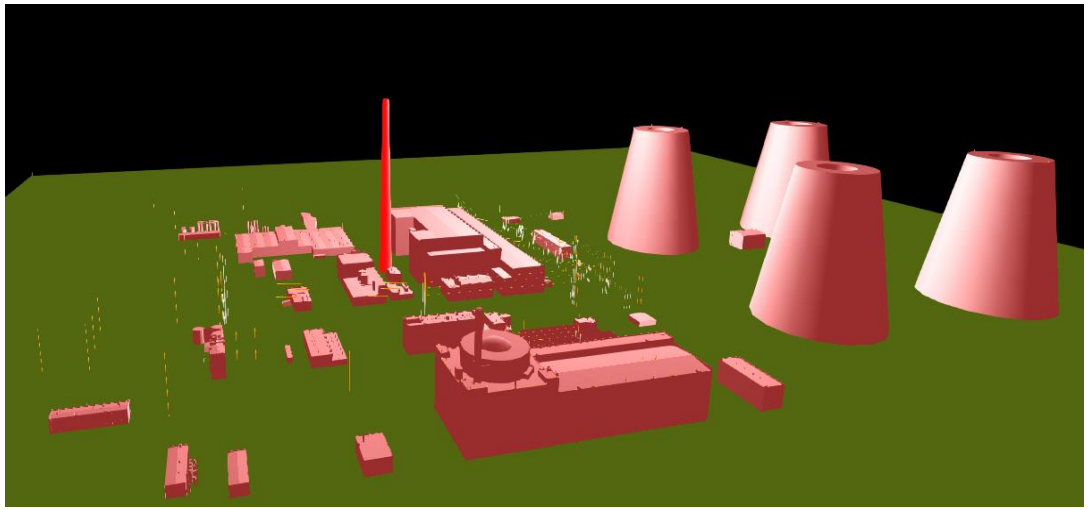
ПС-110 кВ (поблизу м. Світлодарськ)

Забезпечення надійності роботи та безпеки експлуатації електричних станцій та підстанцій спеціалістами НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ» в зоні проведення операції об'єднаних сил (ООС) (2021 рік)

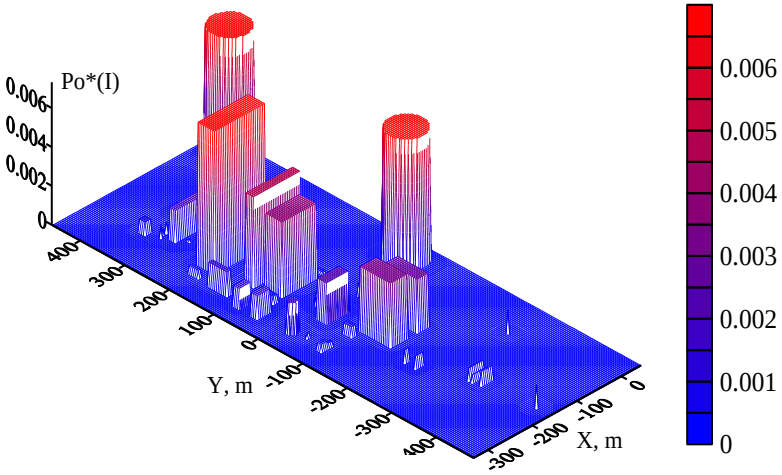
ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ ПРИРОДНЬОГО ТА ШТУЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ



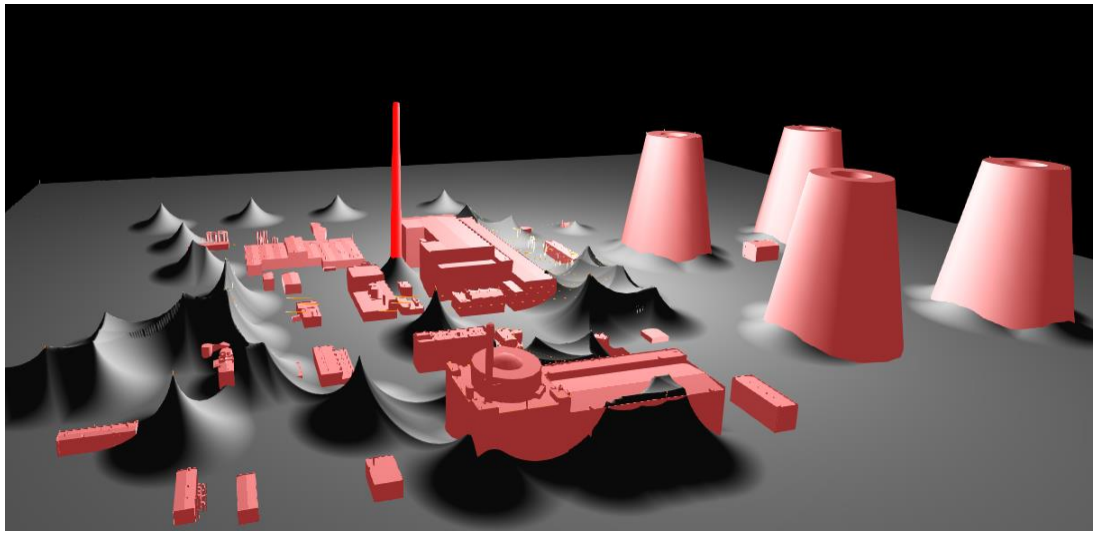
а



в



б



Розподіли щільності ймовірності попадання блискавки в підстанцію (а), резервуар для нафти (б), та зона захисту атомних електростанцій за міжнародним стандартом IEC EN 62305 (в)

ВИСНОВКИ

1. Для забезпечення електромагнітної сумісності та стійкості на етапі розробки нових зразків та їх елементів з наступною сертифікацією готових об’єктів критичної інфраструктури та військової техніки проведено математичне моделювання електрофізичних процесів під дією потужних електромагнітних впливів на основні теорії електромагнітного поля, електродинаміки, електротехніки, математичної фізики і статистики та проведені відповідні експериментальні дослідження.

2. Створено систему сертифікаційних випробувань відповідно до стандартів ЄС та НАТО з електромагнітної стійкості на основі створених в Україні високовольтних стендів. Розроблено експериментальний високовольтний стенд, що реалізує випробування з впливу спеціалізованого електромагнітного імпульсу. Це дозволяє забезпечити електромагнітну стійкість критичної інфраструктури та військової техніки і вивести Україну в один ряд з провідними країнами світу з реалізації випробувань щодо впливу електромагнітних завад.

3. Розроблені засоби експериментально-розрахункового моделювання електромагнітних полів в складних неоднорідних об’єктах, які дозволили розробити системи екранування, заземлення та блискавкозахисту для забезпечення їх надійної та безвідмовної роботи в умовах впливу електромагнітних імпульсів природнього та штучного походження.

ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

1. Розроблену систему сертифікаційних випробувань на відповідність вимогам сучасних стандартів ЄС та НАТО використано при проведенні випробувань різноманітного обладнання критичної інфраструктури та військової техніки в НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», та ДП «Харківстандартметрологія». Виконано випробування для зразків ДП «НАЕК «Енергоатом», КБ «Південне», ДержККБ «ЛУЧ», ДП «ХКБМ ім. О.О.Морозова», ДержНДІХП, тощо.

2. Розроблено і впроваджено системи надійного захисту від електромагнітного впливу штучного та природного походження для стратегічно важливих об'єктів (п’ять АЕС і 1200 підстанцій 35–750 кВ). Впровадження результатів дослідження лише при обстеженні енергоблоків діючих АЕС дозволило зберегти близько 2,9 млрд грн за рахунок не допуску зайвих простоїв.

3. Для забезпечення вимог з безпеки до інформаційних і керуючих систем та їх безперебійної роботи реалізовано сертифікаційні випробування на електромагнітну сумісність та стійкість для всіх атомних електричних станцій України.

Таким чином, в результаті виконання представленої роботи вирішено стратегічно важливе завдання створення і впровадження технологій підвищення безпеки та ефективності функціонування об’єктів критичної інфраструктури України та зразків військової техніки.

Кількість публікацій – 10 монографій (підручників, посібників), у т.ч. 5 у зарубіжних виданнях, 38 статей в журналах, включених до категорії "А" (у т.ч. 14 в зарубіжних виданнях) та 26 статей у журналах, включених до категорії "Б". Загальна кількість посилань на публікації авторів/h-індекс за роботою згідно з базами даних складає відповідно: Web of Science 141/7, Scopus 269/12, Google Scholar – 799/18. Отримано 2 патенти на винахід України, 1 патент на корисну модель, 3 авторські свідоцтва на комп’ютерні програми. За тематикою роботи захищено 5 докторських та 10 кандидатських дисертацій.