

Н. Філімоненко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-1867-3812К. Філімоненко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-9264-4767Н. Смиринська², начальник відділу, ORCID 0000-0001-5373-2625В. Левандовський², конструктор, розробник, ORCID 0000-0003-0033-0694Б. Якутович³, директор¹Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля²Національний університет "Одеська Морська Академія"³ТОВ «Філіп-глобал»

ВИПРОБУВАЛЬНИЙ СТЕНД СПРОЩЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІАЛЬНИХ РІВНЕЙ УРАЖЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ПРИ ВПЛИВІ ПОТУЖНИХ ІМПУЛЬСІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ

В статті розглядається вдосконалення засобів експериментального дослідження в польових умовах стійкості до потужного електромагнітного імпульсу радіоелектронної апаратури виконаної на базі COTS-технології, зокрема в наносекундному діапазоні тривалості імпульсу. Запропоновано варіант випробувального стенду для орієнтовного визначення критеріальних рівней ураження радіо-електронних компонентів при впливі потужних імпульсів електромагнітної енергії.

Ключові слова: радіоелектронні засоби (РЕЗ), потужне електромагнітне випромінювання (ПЕМВ), потужний електромагнітний імпульс (ПЕМІ), COTS-технології, надвисокочастотне випромінювання (НВЧ).

Швидкий розвиток безпілотних транспортних засобів, зокрема безпілотних літальних апаратів (БПЛА), наземних та надводних безпілотних апаратів спричинив не менш швидке зростання кількості підприємств в цій галузі, зокрема в секторі малого та середнього бізнесу. На початку 2024 року у цій галузі в Україні працюють більше 400 підприємств [1].

Швидкими темпами також розвивається перспективний сектор видобутку екологічно чистої вітрової електроенергії, з вітроелектростанцій розміщених в верхніх шарах тропосфери [2]. Для чого використовується безпроводна передача електроенергії за допомогою надвисокочастотного (НВЧ) випромінювання [3]. В березні 2014 р. компанія Altaeros Energies запустила перший в світі літаючий вітрогенератор Buoyant Airborne Turbine Рис.1 [4].



Рисунок 1 - Вітрогенератор Buoyant Airborne Turbine[4]

Сьогодні людська цивілізація споживає близько $18 \cdot 10^{12}$ Вт електроенергії. Як відомо, потенціал енергії вітру біля Землі становить $400 \cdot 10^{12}$ Вт. При цьому енергія вітру в тропосфері оцінюється в $1,8 \cdot 10^{15}$ Вт [2]. Більш того цілком реальним стає впровадження космічної сонячної енергетики з використанням безпроводної передачі електроенергії за допомогою надвисокочастотного випромінювання (НВЧ) [5].

Постановка проблеми

Безпроводна передача електроенергії в повітряному просторі неминуче впливає на радіоелектронні засоби (РЕЗ) літальних апаратів (ЛА), БПЛА, та наземних безпілотних транспортних засобів, що може призвести до пошкодження, або критичного збою радіоелектронних компонентів цих РЕЗ. Оскільки більшість вказаних технічних засобів використовують елементну базу на COTS-технологіях (Commercial off-the-shelf) вірогідність пошкодження, або критичного збою в роботі РЕЗ тільки збільшується. Цілком очевидно, що технології безпроводної передачі електроенергії в повітряному просторі, та технології безпілотних транспортних засобів вже перешкоджають одна одній.

Більше того нещодавно стало відомо, що «Ініціатива сталого розвитку» Ісландії Transition Labs яка розробляє з британською Space Solar та ісландською енергетичною компанією Reykjavik Energy сонячну електростанцію, розташовану за межами атмосфери – на орбіті Землі. Перша установка Space Solar яка має початкову потужність 30 МВт [3]. Сонячна електростанція потужністю 30 МВт буде виведена на орбіту за один запуск за допомогою ракети Starship (SpaceX). Таким чином проблема електромагнітної сумісності безпроводної передачі електроенергії в повітряному просторі та нормального функціонування безпілотних транспортних засобів стає критично актуальною вже в найближчій перспективі [3].

Внаслідок цього в сучасних умовах виробники РЕЗ багато зусиль приділяють розробці методів (способів), а на їх основі створенню приладів захисту РЕЗ від впливу потужних зовнішніх електромагнітних впливів. Зокрема, виробники, які використовують елементну базу на COTS-технологіях вже сьогодні стикаються з проблемою стійкості цієї елементної бази до дії потужного електромагнітного випромінювання (ПЕМВ), зокрема ПЕМІ.

В останній час з'явилося і продовжує з'являтися велика кількість розробок щодо створення електромагнітної зброї (ЕМЗ) [6-11]. Основним об'єктом її ураження є радіоелектронна апаратура, яка складає основу систем управління критичної цивільної інфраструктури та військової техніки, пунктів управління та інших важливих об'єктів військової і критичної цивільної інфраструктури. Цілком вірогідно потрапляння окремих зразків електромагнітної зброї до рук терористичних угруповань. Це вимагає від виробників безпілотних транспортних систем враховувати таку вірогідність.

Відомо два основні фізичних механізми незворотних відмов РЕЗ – електричний пробій та тепловий пробій напівпровідникових структур, що входять до складу елемента РЕЗ [6-7] під дією імпульсів струму та напруги, що наводяться на зовнішній частини електродів елементів під дією електричної та магнітної складових ПЕМІ.

Вплив на РЕЗ потужного електромагнітного випромінювання здійснюється як безпосередньо, так і у якості імпульсних напруг та струмів, які наводяться ПЕМІ в антено-хвиеводних пристроях і лініях зв'язку, що прямують у підсумку на чутливі елементи входів РЕЗ. Основні напрями впливу ПЕМІ – «пряме», через антено-хвиеводний тракт і «зворотній» через отвори та щілини в захисному екрані РЕЗ [6]. Стійкість сучасних РЕЗ до впливу ЕМЗ можливо визначити двома показниками: стійкістю різноманітних елементів до впливу електричних і магнітних полів та стійкістю до імпульсних струмів і напруги, що наводяться. ПЕМІ здатен призвести до деградаційних ефектів у чутливих елементах РЕЗ. Ступінь і характер деградації, що виникають, визначається на базі існуючих теплових та термоелектричних моделей оцінки електромагнітної стійкості РЕЗ до впливу ПЕМІ, найбільш відомими з яких є класична теплова модель Вунша- Белла (W - V), моделі Таска, ААГР, об'ємна теплова модель Двасра-Франкліна-Кемпбелла, модель пошкодження розшарованих структур. Умови застосування кожної з моделей визначаються характеристиками ПЕМІ, генерованого ПЕМВ, і параметрами об'єкта, що піддається впливу [7, 8, 11].

Параметри чутливості елементної бази РЕЗ при впливі ПЕМІ вказані у [6, 8, 11]. Рівні критичної енергії та механізми функціонального ураження різноманітних елементів сучасних РЕЗ неоднакові. В [6, 8, 11] наведено значення критичної та порогової енергії. Але проблемними питаннями на сьогодні є відсутність єдиної бази даних про критеріальні рівні ураження ПЕМІ як окремих радіоелектронних компонентів, так і зразків безпілотних систем.

Критеріальні рівні ураження РЕЗ при впливі ПЕМІ наведені в джерелі [11] визначені за допомогою методик наведених в [12]. Наприклад, орієнтовний рівень ураження НВЧ-діода в [11] становить 10^{-8} Дж в умовах ПЕМІ тривалістю $30 \cdot 10^{-6}$ секунд що цілком може призвести до хибної оцінки стійкості РЕЗ в умовах ПЕМІ тривалістю $10\text{-}30 \cdot 10^{-9}$ секунд.

Таким чином, на сьогодні відсутні універсальні методики та підходи, щодо визначення критеріальних рівнів ураження радіоелектронних компонентів під час впливу ПЕМІ на існуючі та перспективні безпілотні транспортні засоби в різноманітних умовах експлуатації цих засобів.

Аналіз останніх публікацій за проблематикою

В Україні діє низка нормативних документів, які регламентують захист, та випробування РЕЗ та її елементної бази при впливі ПЕМВ, а саме: ДСТУ 3681-98 «Стійкість до дії грозових розрядів» [12], МЭК 801/1000—4, ... [13], ГОСТ 29156-91 «Устойчивость к наносекундным импульсным помехам, Технические

требования и методы испытаний» [14], міжнародний стандарт IEC 61000-4-4 «Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques – Electrical fast transient/burst immunity test» [15].

Методи випробувань які викладені в зазначених міжнародних нормативних документах недосконалі. Наприклад, відомі помилки при проектуванні радіоелектронних засобів сучасних літальних апаратів, зокрема винищувачів F-35A. Експлуатація радіоелектронних засобів цих літаків виявила їх вразливість від потужного електромагнітного випромінювання. В результаті експлуатація цих літаків заборонена на відстані до 40 км від грозових фронтів [16].

Треба відзначити, що реальні експериментальні роботи у галузі визначення критеріальних рівней ураження РЕЗ виконувалися у 70-ті роки на тогочасній елементній базі і можуть бути використані до сучасної елементної бази лише з певними застереженнями. Наприклад в джерелах [56], [11], [21] по суті є тільки посилання на експериментальні роботи виконані в мікросекундному діапазоні тривалості імпульсу по скасованому нині ГОСТ 30374-95.

Метою цієї роботи – є дослідження технічної можливості впровадження на малих і середніх підприємствах – виробниках безпілотних транспортних засобів нескладних та недорогих стендів для орієнтовного визначення критеріальних рівней ураження РЕЗ при впливі ПЕМІ в реальних умовах.

Виклад основного матеріалу дослідження

Відповідно до нормативних документів [12-14] виробник повинен виконувати перевірку РЕЗ та їх елементної бази виключно на базі сертифікованих лабораторних центрів, що є майже неможливим для більшості дрібних виробників, та представників середньої ланки цієї галузі. Частотний діапазон вказаний у нормативних документах [12-14] обмежений частотою 18 ГГц, хоча ще з 60-х років минулого століття активно використовується діапазон «вікна прозорості» 34-40 ГГц. Наприклад, для перевірки РЕЗ за вимогами ДСТУ 3681-98 використовуються вибухомагнітні генератори (ВМГ), в умовах спеціалізованої лабораторії.

Наприклад, фахівці Одеської Морської Академії ВМСУ виконували серії експериментів з ВМГ використовуючи високовольтний генератор NSG 3060, фірми TESEQ (Швейцарія) для перевірки ліній електроживлення на електромагнітну стійкість [16]. Схему експеримента зображено на Рис.2.

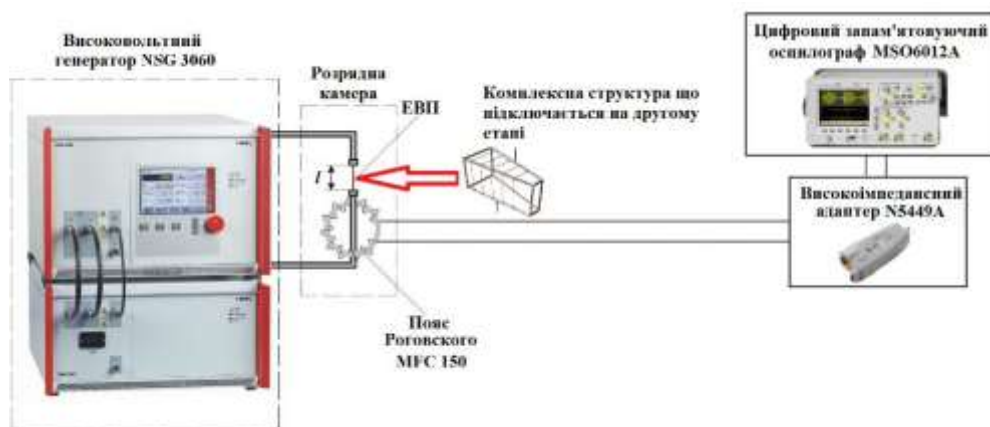


Рисунок 2 - Схема експериментальних досліджень з ВМГ і високовольтним генератором NSG 3060 [16]

Треба відзначити, що в Україні існує спеціалізований дослідницький центр - Експериментальна база дослідно-випробувального полігону Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту «Молнія» Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” [17]. Цей полігон займає площу 270000 м². Розміри дослідницьких стендів цього полігону продемонстровано на Рис.3. Просте підтримання в робочому стані цього дослідницького центру вимагає великих коштів.

На жаль, обладнання цього дослідницького центру дещо застаріло і не дозволяє виконувати досліді складних технічних зразків у відповідності до вимог сучасних нормативних документів [17]. Зауважимо що метою цього дослідницького центру було створення специфічного імітатора електромагнітного імпульсу ядерного вибуху. Крім того цей дослідницький центр, певний час був окупований військами Російської Федерації, зараз знаходиться у зоні бойових дій. У відкритому доступі відсутня інформація щодо доступності вказаного дослідницького центру для використання приватними виробниками РЕЗ.

Треба відзначити що приватні виробники в розвинутих країнах будують такі випробувальні центри за власні кошти, або за підтримки держави, наприклад випробувальний центр фірми SAAB (Швеція), метою якого була власне не імітація ПЕМІ ядерного вибуху, а вплив мікросекундних і наносекундних ПЕМІ в НВЧ-діапазоні [19]. Наскільки потужним може бути такий вплив ПЕМІ на елементи РЕЗ наочно ілюструє зображення з публікації [19] Рис.4, Рис.4а.



Рисунок 3



Рисунок 4 - Шведський НВЧ-тестовий стенд [19]



Рисунок 4а - Пошкодження транзистора [19]

Для перевірки РЕЗ в умовах польових випробувань автори пропонують нескладний у виготовленні стенд з НВЧ генератором наносекундних ПЕМІ на базі серійного імпульсного магнетронного генератора, наприклад МІ-241 (МІ-514 частота 14570-15420 МГц, потужність 150 кВт) з пристроєм часової компресії, стисненням мікрохвильового імпульсу до тривалості $10\text{-}30 \cdot 10^{-9}$ сек, потужністю 1-1,5 МВт.

Стиснення мікрохвильового імпульсу — загалом це перетворення довготривалого імпульсу мікрохвильової потужності в імпульс з меншою тривалістю і більшою амплітудою. Опис вказаної методики стиснення імпульсу наведено в джерелах [20, 21, 22]. Схематично будову випробувального стенду показано на Рис.5. Стенд містить джерело живлення магнетронів (на схемі умовно не показано), магнетрони - 1, хвилеводи - 2, обертові зчленування хвилеводів - 3, компресор стиснення мікрохвильового імпульсу - 4, лінзову (параболічну) антену - 5, цапфи кріплення антени до лабораторного штатива (тримача) - 6. Будова компресора імпульсів на довжині хвиль 22 мм (МІ-241 - частота $\sim 13,64$ ГГц) в цілому відповідає конструкції наведених в [20] і показана на Рис.5а.

За підрахунками авторів маса стенду не перевищує 8 кг, габарити складають 0,5х0,5х0,8 м (без джерела первинного – потужністю до 15 кВт, та вторинного живлення потужністю до 10 кВт).

При використанні магнетронів IP Mag-457 (Рис.6, Рис.6а) компанії Insight Product Co, (США) [23] в діапазоні 34-38 ГГц і компресора стиснення мікрохвильового імпульсу цілком можливо отримати імпульсну потужність на рівні 10-15 МВт, що дає можливість проводити випробування РЕЗ в польових умовах. Фактично ці пристрої є продукцією ВАТ «Плутон» м. Москва, тому автори пропонують використати більш доступну альтернативу – магнетрон МІ-514М потужністю 150 кВт.

Висновки:

1. Показана можливість побудови компактного, нескладного стенду для випробувань РЕЗ виконаних на СOTS-технологіях на стійкість до ПЕМІ в наносекундному діапазоні тривалості імпульсу,
2. Використання магнетронів потужністю 150 кВт, та простого пристрою часової компресії, стисненням мікрохвильового імпульсу до тривалості $10\text{-}30 \cdot 10^{-9}$ сек, дає можливість забезпечити потужність НВЧ-випромінювання при випробовуваннях РЕЗ на рівні 1-1,5 МВт.

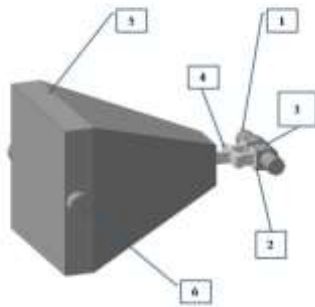


Рисунок 5

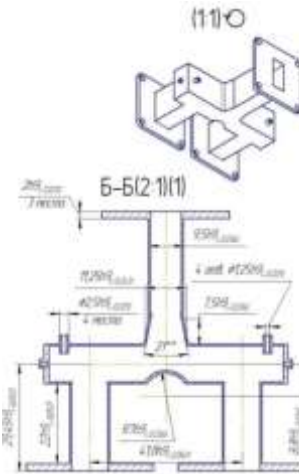


Рисунок 5а

3.



Рисунок 6 - магнетрон IP Mag-457 [23]

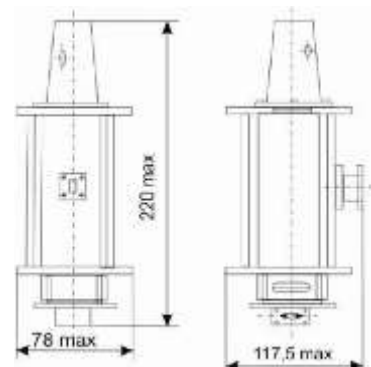


Рисунок 6а - магнетрон IP Mag-457 [23]

Список використаної літератури

1. <https://www.mil.gov.ua/news/2024/02/01/rustem-umerov-na-zustrichi-z-virobnikami-bpla/>;
2. 30 MW space solar plant designed to send electricity to Earth by 2030 <https://interestingengineering.com/energy/30-mw-space-solar-plant-designed-to-send-electricity-to-earth-by-2030> ;
3. https://www.meteo-vesti.ru.translate.goog/news/63483645358-troposfera-darit-elektroenergiyu-chelovechestvu?_x_tr_sl=ru&_x_tr_tl=en&_x_tr_hl=en&_x_tr_pto=sc&_x_tr_hist=true ;
4. Experiments with Alternating Currents of Very High Frequency and Their Application to Methods of Artificial Illumination, AIEE, Columbia College, N.Y., May 20, 1891 <http://www.tfcbooks.com/tesla/1891-05-20.htm>.
5. Altaeros Energies, Inc. – Buoyant Airborne Turbine (BAT) https://lynceans.org/wp-content/uploads/2024/11/Altaeros-Energies_BAT.pdf ;
6. <https://www.cnbc.com/2019/03/15/china-plans-a-solar-power-play-in-space-that-nasa-abandoned-long-ago.html>;
7. Критерии функционального поражения современных радиотехнических систем электромагнитным оружием, Кузнецов Д. В. Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) №4 (13), 2015;
8. Wunsch D.S, Bell R.R. Determination of threshold failure level of semiconductor diodes and transistors due to pulse voltage // IEEE Trans. on Nuclear Sci., Vol.15, N6, 1968.-p.244-259.;
9. Д.Б. Кучер, Л. В. Литвиненко, Н. Б. Смиринська, Модель накопичення пошкоджень інтегральними елементами інформаційних систем при поліімпульсному впливі наносекундної тривалості, Системи обробки інформації: збірник наукових праць / ХУПС ім. І. Кожедуба. – Харків, 2017. – №4(150). – С. 11 – 15 <https://doi.org/10.30748/soi.2017.150.02>.
10. Dwyer V.M., Franklin A.J., Campbell D.S. Thermal failure in semiconductor devices // Solid State Electronics.-1990.-Vol.33, p.553-560.
11. Dwyer V.M., Franklin A.J., Campbell D.S. Electromagnetic discharge thermal failure in semiconductor devices // IEEE Trans. on Electr. Dev. Vol.37, N11, 1990.- p.2381-2387.
12. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В.Д. Добыкин, А.И. Куприянов, В.Г. Пономарев, Л.Н. Шустов; под. ред. А.И. Куприянова. – М.: Вузовская книга, 2007. – 487 с.;

13. ДСТУ 3681-98 Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до дії грозових розрядів. Технічні вимоги та методи випробувань;
14. ДСТУ EN 61000-4-24:2012 Електромагнітна сумісність. Частина 4-24. Методи випробування та вимірювання. Методи випробування пристроїв захисту від електромагнітного імпульсу висотного ядерного вибуху та інших кондуктивних збурень. Базова публікація ЕМС;
15. ДСТУ EN 61000-4-23:2012 Електромагнітна сумісність. Частина 4-23. Методи випробування та вимірювання. Методи випробування пристроїв захисту від електромагнітного імпульсу висотного ядерного вибуху та інших випромінюваних збурень;
16. ДСТУ EN 61000-4-4:2019 Електромагнітна сумісність. Частина 4-4. Методи випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до електричних швидких перехідних процесів/пакетів імпульсів (EN 61000-4-4:2012, IDT; IEC 61000-4-4:2012, IDT);
17. Pentagon won't lift F-35A lightning restrictions after hardware and software fix Valerie Insinna on November 21, 2022 at 1:38 PM <https://breakingdefense.com/2022/11/pentagon-wont-lift-f-35a-lightning-restrictions-after-hardware-and-software-fix/> ;
18. Кравченко В.І. Випробувальний полігон НДПКИ «Молнія» для забезпечення стійкості об'єктів військової техніки від впливу вражаючих факторів природного та штучного походження. Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід (Київ, 22-23 вересня 2015), відп. ред. В.С.Шовкалюк. – К.: ТОВ «Міжнародний виставковий центр», 2015. – С. 65-74;
19. Д. Б. Кучер, Л. В. Кучер, Н. Б. Смиринська, Г. В. Лишак Експериментальні дослідження комплексної структури електровибухаючих провідників Системи та технології, № 2 (60), 2020 2, с 5-32, <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2020.2-60.1>
20. Susceptibility of Electronic Systems to High-Power Microwaves: Summary of Test Experience Mats G. Bäckström, Member, IEEE, and Karl Gunnar Lövstrand, Senior Member, IEEE - IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 46, NO. 3, AUGUST 2004 https://www.researchgate.net/publication/3056672_Susceptibility_of_Electronic_Systems_to_High-Power_Microwaves_Summary_of_Test_Experience ;
21. Пристрій часової компресії імпульсів НВЧ-енергії, патент на винахід № 2472260C1 МПК H01P 7/00;
22. Микроволновый источник мультигигаватной пикової мощности на основе комбинации релятивистской лампы обратной волны и компрессора / В. Л. Братман, Г. Г. Денисов, Н. Г. Колганов, С. В. Мишакин, С. В. Самсонов, Д. Н. Соколов. // ЖТФ - 2011. - Т. 81, Вып. 2. - С. 113-117;
23. Microwave Pulse Compression Experiments At Low Power <https://www.ursi.org/proceedings/procGA08/papers/E02p3.pdf>.
24. Insight Product Co. pulse magnetrons, magnetrons, unilament magnetrons, <https://insight-product.com/products3.htm> ;

N. Filimonenko ¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-1867-3812

K. Filimonenko ¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-9264-4767

N. Smirinska ², department head, ORCID 0000-0001-5373-2625

V. Levandovski ², designer, developer, ORCID 0000-0003-0033-0694

B. Yakutovich ³, director

¹Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

²Національний університет "Одеська Морська Академія"

³LLC "FILTIM GLOBAL"

A TEST STAND OF SIMPLIFIED DESIGN FOR DETERMINING THE CRITERION LEVELS OF DAMAGE TO RADIOELECTRONIC COMPONENTS WHEN EXPOSED TO POWERFUL PULSES OF ELECTROMAGNETIC ENERGY

This article examines how to improve experimental research for field conditions of resistance to a powerful electromagnetic pulse of radio-electronic equipment made on the basis of COTS technology, in particular in the nanosecond range of pulse duration. A test stand is proposed for tentatively determining the criterion levels of damage to radio-electronic components under the influence of powerful pulses of electromagnetic energy.

Keywords: radio electronic means (REZ), powerful electromagnetic radiation (PEMV), powerful electromagnetic pulse (PEMI), COTS technologies, microwave radiation (MHF).

Надійшла: 14.11.2024

Received: 14.11.2024