

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ВИКОРИСТАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДУ ПРОВЕДЕННЯ ЯКІСНОГО КОНТРОЛЮ І КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ЗАСОБУ ДО ДІЇ ПОТУЖНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ

Фик О. І.

1. Вступ

Існують різні підходи до якісного контролю і кількісної оцінки стійкості радіоелектронного засобу (РЕЗ) до впливу потужного електромагнітного впливу (ПЕМВ) [1]. Одним з найбільш загальних підходів є строгий математичний метод, що реалізує математичну модель РЕЗ у взаємодії з зовнішніми і внутрішніми перешкодами, що дозволяє оцінити працездатність РЕЗ у заданій завадовій ситуації [2–4]. Однак реально створити такі моделі, що враховують повною мірою всі зв'язки між впливаючими на РЕЗ сигналами і її власними характеристиками, дуже важко. Тому на практиці, як правило, створюють математичні моделі окремих пристроїв РЕЗ чи її загальну спрощену модель. Це дозволяє оцінити якісну картину досліджуваних процесів, але не дає високу вірогідність кількісних оцінок [5–7]. Для окремих пристроїв РЕЗ при оцінці їхньої стійкості може бути застосований метод еквівалентних схем. Даний метод дає гарні результати при аналізі досить простих по своїй функціональній побудові пристроїв РЕЗ. При оцінці різного виду високочастотних пристроїв, таких як антенно-фідерні, радіоприймальні та радіопередавальні, котрі є неодмінною складовою частиною більшості РЕЗ, з успіхом застосовується спектральний метод аналізу. Цей метод дозволяє оцінити ступінь впливу ПЕМВ на роботу високочастотного тракту. Тому актуальним є дослідження методики експериментальної оцінки стійкості РЕЗ до впливу ПЕМВ.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є функціонування РЕЗ при його опроміненні ПЕМВ.

Одним з найбільш проблемних питань є відсутність загальної методики кількісної оцінки стійкості РЕЗ до руйнівної дії напруженості поля ПЕМВ. Тому у роботі пропонується використати експериментальний спосіб оцінки рівня стійкості режимів функціонування РЕЗ при його опроміненні ПЕМВ. Це дозволить враховувати зв'язки між окремими пристроями РЕЗ та їхні конструктивні, монтажні, технологічні й інші особливості. Це дозволить також ефективно сформулювати умови застосування експериментального підходу щодо проведення кількісної оцінки стійкості РЕЗ до руйнівної дії напруженості поля (електричної та(або) магнітної складової) ПЕМВ та визначити відповідний перелік показників електромагнітної стійкості РЕЗ.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – визначення умов використання експериментальної методики проведення якісного контролю і кількісної оцінки стійкості РЕЗ до дії ПЕМВ.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі наукові завдання:

1. Визначити основні параметри, які визначають стійкість РЕЗ і підлягають контролю при впливі ПЕМВ.

2. Визначити особливості методів випробувань, пов'язаних з визначенням стійкості РЕЗ до, під час і після впливу ПЕМВ.

3. Визначити перелік задач, які виникають, в залежності від етапу розробки нових РЕЗ, їхньої структури і функціонального призначення при оцінці стійкості РЕЗ до ПЕМВ.

4. Запропонувати схему котрольно-випробувального стенда та надати рекомендації для проведення комплексних випробувань РЕЗ на стійкість до впливу ПЕМВ.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Уражуюча дія ПЕМВ на системи РЕЗ може бути обумовлена як безпосереднім впливом імпульсних електромагнітних полів на електричні та радіотехнічні ланцюги, так і наведенням в з'єднувальних лініях і ланцюгах струму та напруги [7–9]. Чутливість обладнання системи зв'язку до дії ПЕМВ в значній мірі залежить від її положення щодо напрямку векторів електричного та магнітного полів, геометричних розмірів електричних мереж та контурів, їх конфігурації, взаємних зв'язків, номіналів електричних навантажень. А також, слід враховувати: значення ємнісних та індуктивних зв'язків з елементами конструкції системи зв'язку та навколишнього середовища, якість екранування та способу заземлення, наявність фільтрів та обмежувачів перенапруження. Рішенням проблеми оцінки електромагнітної стійкості, як одного з показників електромагнітної сумісності на глобальному рівні займаються багаточисельні міжнародні організації під егідою ООН. Найбільш широко веде роботу Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК) і її спеціальний комітет з радіоперешкод (СІСПР), а також Європейський комітет по стандартизації в галузі електротехніки (СЕНЕЛЕК) [10]. В Україні існують стандарти [10, 11], які дозволяють визначити підходи щодо визначення стійкості до удару блискавки на РТЗ та вимоги до сумісності побутових приладів. Решта досліджень спрямовані на розгляд окремих випадків дії електромагнітних впливів з відомою структурою на окремі системи, структура яких також відома.

Зокрема, автори робіт [6, 9] пропонують побудову захисту об'єктів телекомунікацій від широкосмугового електромагнітного впливу. Автори роботи [2] оцінюють стан телекомунікації з урахуванням дії широкосмугового випромінювання. Дослідження факторів виникнення загроз порушення електромагнітної цілісності телекомунікаційних систем від використання електромагнітної зброї представлено в роботі [12].

Автор роботи [13] досліджує чинники електромагнітної зброї, яка розробляється США з метою їх використання у бою. Автором зазначається, що системи електромагнітної зброї є першими системами зброї, які можуть одночасно захищати проти ворожих атак радіотехнічними засобами, і в той же час зненацька уражає електромагнітним імпульсом ворожі системи за полем бою. Наводяться експериментальні дані щодо стійкості деяких військових радіотехнічних систем.

На думку автора роботи [14], електромагнітне ураження та захист від нього РЕЗ військового та цивільного значення є важливим завданням сучасних армій. Для адекватного оцінювання рівня електромагнітної стійкості РЕЗ потрібно досліджувати вплив різних чинників дії ПЕМВ, оскільки вона є різноплановою і потребує досліджень щодо етапів розробки РТЗ.

Автором роботи [15] розроблена технологія забезпечення відсутності стійкості обчислюваної техніки на етапі проектування та розміщення всередині будинку. Це дозволяє проводити повне прогнозування завадостійкості та зниження перешкод при широкополосних електромагнітних впливах. На етапі проектування розроблені технології забезпечення завадозахищеності обчислювальної техніки.

Автори робіт [16, 17] проводять дослідження рівня сприятливості конкретних зразків (систем) радіотехніки та електроніки до деструктивного електромагнітного впливу з відомими параметрами. Авторами наводяться результати експериментів щодо зовнішнього впливу електромагнітного поля на приймач через антенно-фідерний тракт (АФТ), та робиться висновок, що дві третини енергії, що вражає, проникає через АФТ.

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок про доцільність загального дослідження умов використання експериментальної методики проведення якісного електромагнітного контролю РТЗ та необхідність визначення параметрів кількісної оцінки стійкості РТЗ до дії потужного електромагнітного впливу.

5. Методи досліджень

Для вирішення поставлених завдань було використано наступні методи: теоретичного узагальнення, аналізу та синтезу, метод представлення вузлів (частин) РЕЗ еквівалентними схемами, метод окремого аналізування стійкості вузлів (частин, пристроїв).

5.1. Основні параметри, які визначають стійкість РЕЗ і підлягають контролю при впливі ПЕМВ

У залежності від етапу розробки РЕЗ, їхньої структурної схеми, функціонального призначення й умов експлуатації експериментальна оцінка стійкості РЕЗ може включати виміри:

- параметрів зовнішніх ПЕМВ, що впливають на РЕЗ;
- параметрів перешкод у внутрішніх ланцюгах і лініях зв'язку РЕЗ, а також між РЕЗ і КВА;
- параметрів окремих частин РЕЗ до і після впливу ПЕМВ;
- параметрів РЕЗ у цілому до і після впливу ПЕМВ;
- параметрів РЕЗ у цілому під час впливу ПЕМВ.

Сучасні РЕЗ складаються з таких різних за своїм функціональним призначенням пристроїв, як антенно-фідерні, прийомні і передавальні, цифрові обчислювальні, керуючі і синхронізуючі. Кожен із перерахованих пристроїв містить велику кількість різноманітних зв'язків і електрорадіоелементів (ЕРЕ), тому оцінка стійкості РЕЗ являє собою дуже складну технічну задачу.

Параметрами, що визначають стійкість РЕЗ, варто вважати ті характеристики ПЕМВ і параметри РЕЗ, що істотно впливають на якість їхнього функціонування (відповідність технічних характеристик РЕЗ заданим вимогам). Їх можна розділити на параметри, які характеризують заводську обстановку, створювану самими РЕЗ, і на параметри, що характеризують ступінь сприйнятливості різних частин РЕЗ до впливу ПЕМВ.

Розглянемо основні параметри РЕЗ, які характеризують ступінь їхньої сприйнятливості до впливу ПЕМВ. Під сприйнятливістю РЕЗ розуміється ступінь реакції РЕЗ на вплив ПЕМВ разом з основним сигналом і без нього через антену, екран, по ланцюгах живлення, заземлення, керування і комутації. Ступінь сприйнятливості РЕЗ до впливу ПЕМВ в основному визначається радіоприймальним пристроєм і пристроями обробки цифрової інформації. Основні шляхи впливу ПЕМВ на РЕЗ показані на рис. 1, 2.

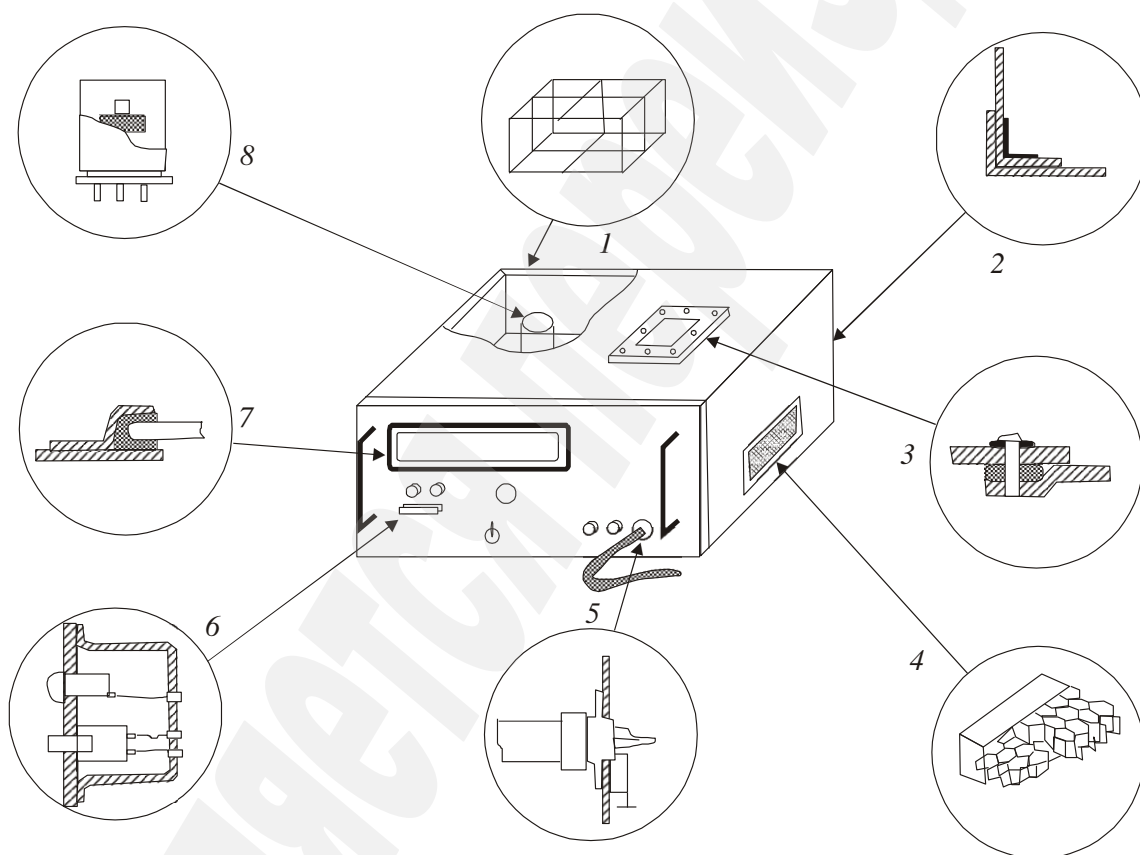
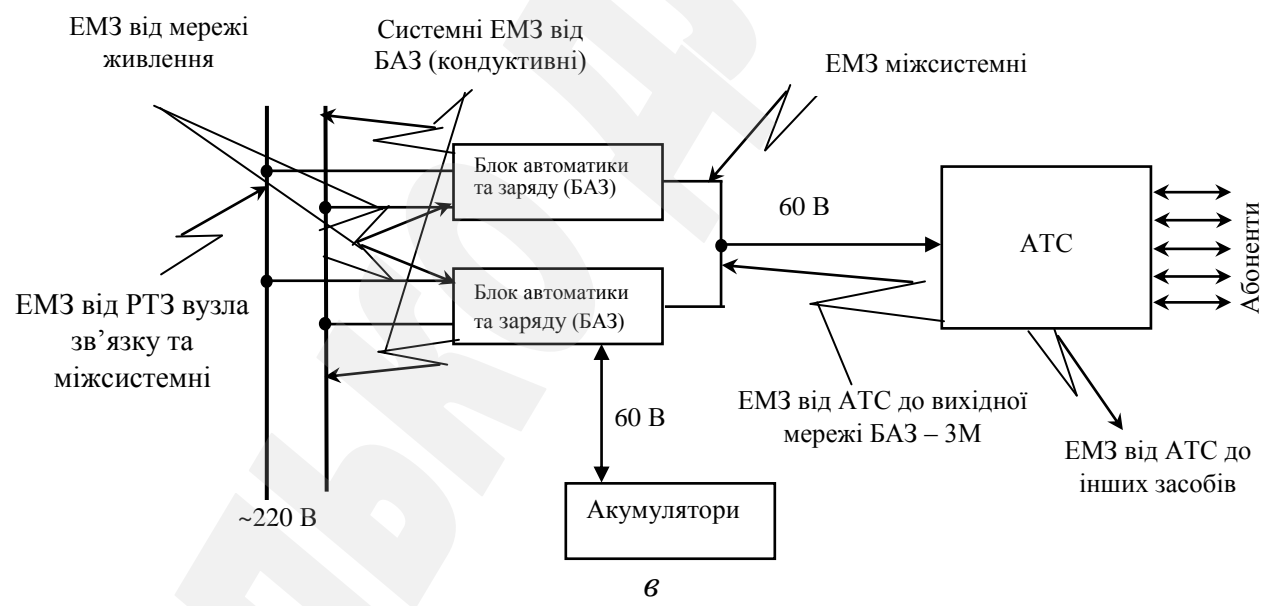
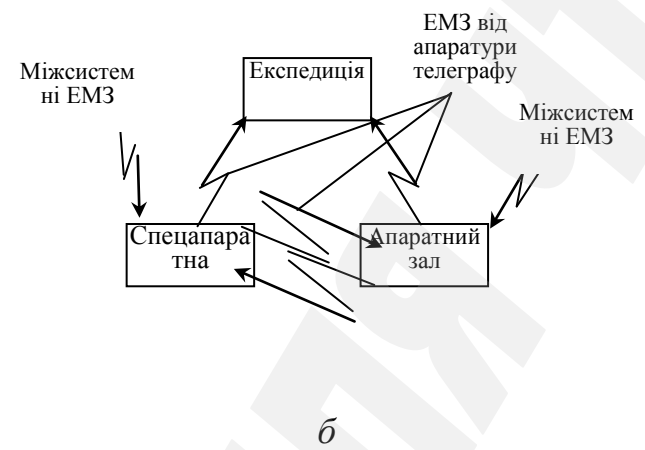
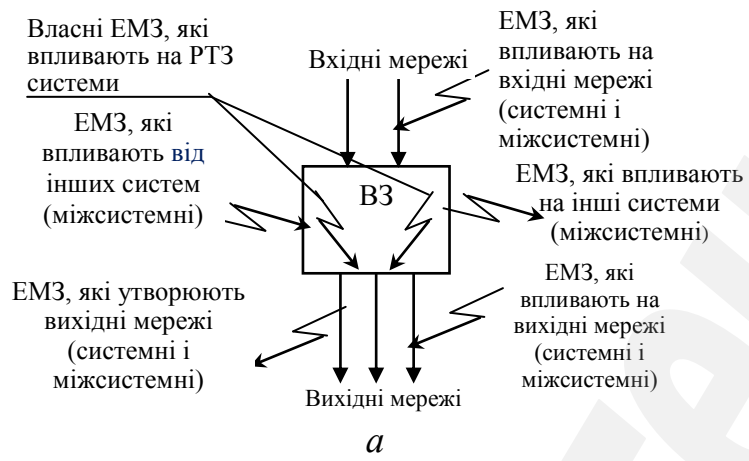
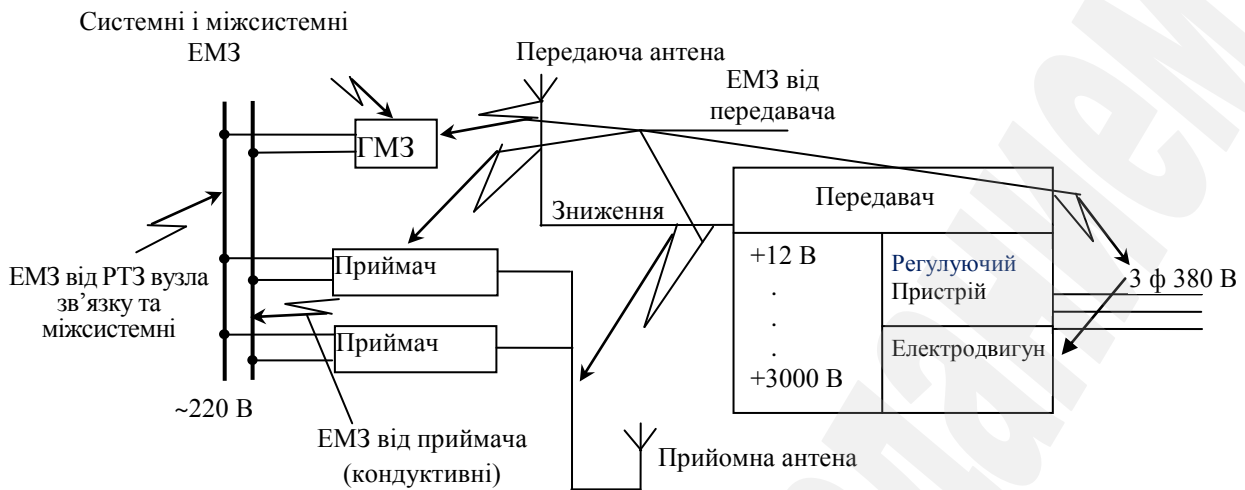


Рис. 1. Шляхи проникнення потужного електромагнітного впливу в середину окремого блоку радіоелектронного засобу (РЕЗ) та способи блокування такого проникнення: 1 – зварена рама корпусу РЕЗ; 2 – безперервність корпусу РЕЗ; 3 – електромагнітні ущільнювальні прокладки; 4 – вентиляційні і врубівні отвори; 5 – кабелі і різні контактні з'єднання; 6 – додаткове часткове екранування; 7 – провідні прозорі матеріали; 8 – локальне екранування





2

Рис. 2. Схема впливу електромагнітної завади (ЕМЗ) на вузлі зв'язку та його окремих елементах: а – загальна схема впливу ЕМЗ; б – схема дій ЕМЗ у підсистемі вузол зв'язку-телеграф; в – схема дій ЕМЗ у підсистемі вузол зв'язку-АТС; г – функціональна схема роботи прийомно-передаючого радіоцентру та впливу ЕМЗ

Канал прийому корисного сигналу (рис. 2, г) характеризується:

- чутливістю $P_{c.min}$;
- частотною вибірковістю (смуга пропущення, коефіцієнт прямокутності амплітудно-частотної характеристики (АЧХ));
- нестабільністю частоти гетеродина приймача;
- внутрішніми шумами вхідних каскадів приймача;
- нелінійністю характеристик застосовуваних у приймачі підсилювачів і змішувачів, що є причиною розширення спектра прийнятого сигналу.

Важлива характеристика, що дозволяє судити про сприйнятливість РЕЗ по каналу прийому корисного сигналу, це відношення:

$$U_c / (U_{ш} + U_n),$$

де U_c , $U_{ш}$, U_n – відповідно, напруги корисного сигналу, шуму і перешкоди на вході приймача. Для нормального прийому корисного сигналу з потужністю P_c повинне задовольнятися умова $P_c > P_{c.min}$. Задане значення зазначеного відношення є одним з найбільш часто використовуваних на практиці критеріїв, що дозволяють кількісно оцінити сприйнятливість РЕЗ до впливу ПЕМВ по каналу корисного сигналу.

На сприйнятливості РЕЗ до впливу ПЕМВ у значній мірі також впливають характеристики АФТ прийомного тракту, а саме:

- ширина головного пелюстка діаграми спрямованості(ДС);
- рівні бічних пелюстків ДС АФТ;
- коефіцієнт спрямованої дії;
- ефективна площа антени S_{ef} ;
- поляризаційні параметри антени [3, 7, 9].

У [7, 9] показано, що ПЕМВ впливає на роботу РЕЗ не тільки за рахунок проходження каналом прийому корисного сигналу. Її вплив приводить до появи наведених струмів і напруг у ланцюгах заземлення, керування й ін. Ці шляхи проникнення поряд з раніше перерахованими також становлять великий інтерес при оцінках стійкості і прогнозування поведінки РЕЗ в умовах впливу ПЕМВ.

5.2. Методи контролю параметрів РЕЗ до, під час і після впливу ПЕМВ

На початкових етапах розробки РЕЗ головною метою випробувань є перевірка ефективності прийнятих технічних рішень, вибір оптимальних варіантів конструкції апаратури, оцінка запасу за стійкістю й електричною міцністю. На цих етапах важливе місце займає вимір наведень у ланцюгах окремих досліджуваних пристроїв. На наступних етапах усе більшого значення набуває контроль вихідних параметрів РЕЗ при впливі на них ПЕМВ і перевірка їхньої відповідності заданим вимогам [10, 11].

Особливостями методів випробувань, пов'язаних з визначенням стійкості РЕЗ до впливу ПЕМВ, є:

- широкий діапазон частот як корисних сигналів, так і перешкод;
- іспиту РЕЗ у ближній зоні впливу ПЕМВ;
- вимір статистичних параметрів ПЕМВ;
- вимір наведень у різних ланцюгах РЕЗ при впливі ПЕМВ;
- проведення математичної обробки результатів виміру з метою розробки рекомендацій, що дозволяють підвищити завадостійкість РЕЗ;
- пошук і реалізація при розробці контрольно-вимірювальної апаратури (КВА) нових конструкторських і технологічних рішень, що забезпечують більш високий ступінь вірогідності одержуваних результатів у більш короткі проміжки часу;
- розробка нових більш завадостійких видів зв'язку між окремими частинами КВА і досліджуваними РЕЗ при створенні вимірювальних стендів.

При виборі методу контролю стійкості РЕЗ необхідно орієнтуватися на такі методи, що були б досить просто реалізовані і давали б при цьому задовільну точність.

У залежності від етапу розробки РЕЗ, їхньої структури і функціонального призначення при оцінці стійкості РЕЗ послідовно можуть виникати наступні задачі:

- визначення характеристик електричної і магнітної складових полів ПЕМВ, що впливають на РЕЗ;
- визначення напруг і струмів, що наводяться, у ланцюгах РЕЗ і на міжблочних лініях зв'язку в результаті дії ПЕМВ;
- визначення зміни форми вихідних сигналів і режимів роботи окремих елементів, схем і пристроїв РЕЗ під час і після впливу ПЕМВ на РЕЗ;
- виявлення елементів, блоків, пристроїв РЕЗ, найбільш критичних до впливу ПЕМВ.

6. Результати досліджень

Загальна схема контрольно-вимірювального стенду для виконання електромагнітних досліджень РЕЗ наведена на рис. 3.

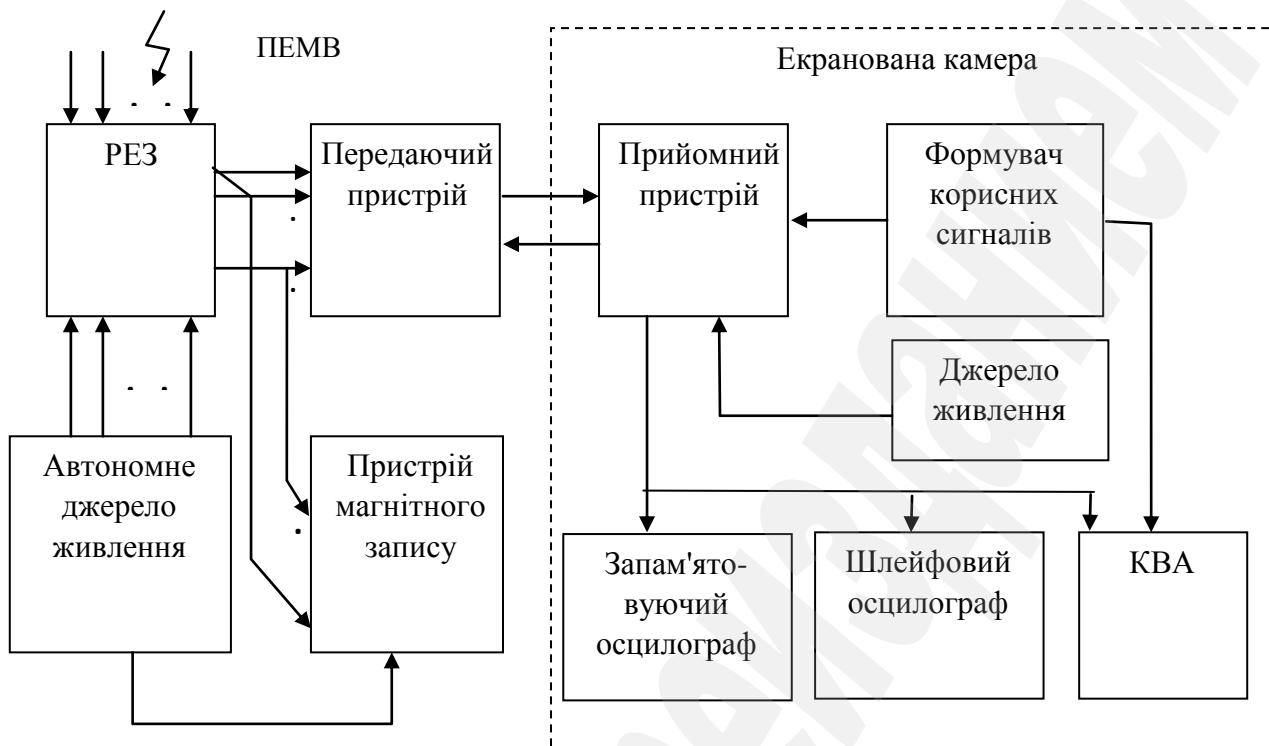


Рис. 3. Структурна схема універсального контрольно-випробувального стенда для проведення комплексних випробувань радіоелектронного засобу на стійкість до дії потужного електромагнітного впливу

При виборі конкретного методу вимірів на різних етапах розробки РЕЗ будуть корисними дані про характер специфічних порушень окремих пристроїв і схем апаратури (табл. 1), з якої буде складатись (або складається) РЕЗ при впливі на неї ПЕМВ.

Таблиця 1

Типові порушення в пристроях радіоелектронних засобів при дії потужного електромагнітного впливу

Клас РЕЗ (складової частини РЕЗ)	Характер порушень	Примітка
Лінійні схеми: підсилювачі синусоїдальних сигналів, відеопідсилювачі, підсилювачі постійного струму	Перекручування форми вихідних сигналів, поява помилкових сигналів, самозбудження	Мінімальна енергія перешкоди, що викликає збій підсилювача з великим коефіцієнтом підсилення $W_n=(1...10^5)10^{-20}$ Дж
Імпульсні і логічні схеми (ключі, тригери, мультивібратори, блокінг-генератори, граничні пристрої і т. п.)	Перекручування форми вихідних сигналів, втрата інформації у вузлах пам'яті	Мінімальна енергія перешкоди, що викликає збої в логічних схемах, $W_n=(1...10)10^{-9}$ Дж
Генератори синусоїдальних сигналів, генератори сигналів спеціальної форми	Збій частоти, короточасне перекручування форми сигналу, втрата інформації	Найбільш стійкі до впливу ПЕМВ генератори з кварцовою стабілізацією частоти
Антенно-фідерні пристрої (АФП)	Поява в навантаженні АФП перешкоди	Найбільш уразливі до впливу ПЕМВ лінійні антени; можливі: незворотні відмовлення СВЧ діодів
Джерела живлення	Короточасна зміна вихідної напруги	—

Контроль стійкості РЕЗ до впливу ПЕМВ, як правило, складається з двох основних етапів. На першому контролюються параметри РЕЗ, що впливають на їхню електромагнітну сумісність, до впливу на РЕЗ ПЕМВ, а потім ті ж самі виміри проводяться після впливу ПЕМВ. У цьому випадку КВА не піддається безпосередньо впливу ПЕМВ, що дозволяє застосовувати традиційні методики виміру і стандартні контрольно-вимірювальні прилади. Другий етап контролю – це оцінка стійкості РЕЗ під час впливу ПЕМВ. Такий вид контролю більш об'єктивний, хоча його проведення пов'язане з низкою серйозних труднощів.

За результатами проведених випробувань судять про *характер порушень працездатності РЕЗ* при впливі ПЕМВ із заданими характеристиками. При цьому порушення працездатності РЕЗ можуть бути як незворотніми, так і зворотніми і зв'язані або з виходом з ладу її окремих елементів, або з появою неприпустимих помилкових сигналів у їхніх ланцюгах. Існують різні критерії оцінки працездатності РЕЗ при впливі ПЕМВ, у тому числі енергетичні і часові [4, 5, 12]. Енергетичні критерії засновані на визначенні мінімальної енергії перешкоди, за якої відбувається відмовлення РЕЗ, а часові – на визначенні мінімального часу відновлення РЕЗ після збою в роботі в результаті впливу ПЕМВ.

Енергетичні критерії засновані на визначенні мінімальної енергії перешкоди, за якої відбувається відмовлення РЕЗ, а часові – на визначенні мінімального часу відновлення РЕЗ після збою в роботі в результаті впливу ПЕМВ.

До *контрольно-вимірювальної апаратури*, використовуваної для контролю стійкості РЕЗ під час впливу ПЕМВ, пред'являється ряд додаткових твердих технічних вимог. Одним зі способів задоволення цих вимог є виведення ряду контрольованих сигналів із зони впливу ПЕМВ. У загальному випадку це може бути здійснено за допомогою передавального і прийомного пристроїв, а також лінії зв'язку.

Передавальний пристрій, використовуваний для висновку інформації з зони впливу ПЕМВ, призначено для перетворення контрольованого параметра досліджуваних РЕЗ у сигнал, зручний для його передачі по лінії зв'язку в КВА. Тому що передавальний пристрій має розташовуватися в зоні впливу ПЕМВ і безпосередньо підключатися до РЕЗ, до нього пред'являються особливо високі вимоги по завадостійкості, впливу на випробувану апаратуру, габаритним розмірам, споживанню тощо.

Прийомний пристрій перетворить переданий сигнал до виду, зручного для виміру і реєстрації в КВА. Оскільки прийомний пристрій у цьому випадку розташовано на деякій відстані від зони впливу ПЕМВ, до нього пред'являють менш тверді вимоги [8, 9].

Як *лінії зв'язку* використовуються проводи, кабелі, хвилеводи, а також середовище між прийомним і передавальним пристроями. По лініях зв'язку можуть передаватися звукові, радіо- і оптичні сигнали. Загальна структурна схема універсального контрольно-випробувального стенда, призначеного для проведення випробувань РЕЗ на стійкість до, під час і після впливу ПЕМВ, приведена на рис. 1 [5, 8, 9].

Контрольно-випробувальний стенд (рис. 3) має відповідати наступним

основним вимогам:

- впливати на роботу випробуваних РЕЗ;
- мати швидкодію, достатню для реєстрації очікуваної зміни контрольованих сигналів РЕЗ і перехідних процесів у їхніх ланцюгах;
- володіти необхідною багатоканальністю, що дозволяє реєструвати всю сукупність сигналів, що характеризують роботу РЕЗ;
- володіти високою завадостійкістю.

Винесення КВА й окремих вимірювальних засобів із зони впливу ПЕМВ за допомогою передавального і прийомного пристроїв дозволяє виключити чи істотно зменшити вплив ПЕМВ на основну частину КВА. І, отже, використовувати в її складі стандартні вимірювальні прилади, застосовувані при періодичних перевірках РЕЗ. Усе-таки деякі з пропонованих до випробувального стенда вимог, наприклад, швидкодія і завадостійкість, можуть виявитися взаємовиключними, що при високих рівнях напруженості поля ПЕМВ робить розробку такого стенда досить складною задачею.

Для виміру і реєстрації низькочастотних сигналів: параметрів джерел літання РЕЗ; сигналів керування; сигналів телеметрії; кодових структур переданих сигналів і т. д. у складі контрольно-випробувального стенда можуть бути використані стандартні запам'ятовуючі осцилографи, у тому числі шлейфові. Шлейфові осцилографи відносять до інерційних приладів, вони практично не реагують на короткочасні імпульсні перешкоди, що дозволяє знизити вимоги до їхнього захисту.

Для контролю сигналів у високочастотних трактах РЕЗ під час впливу ПЕМВ, а також виникаючих при цьому перехідних процесів у ланцюгах апаратури в більшості випадків використовують спектральні методи, які можна розділити на прямі і непрямі. Прямі спектральні методи виміру засновані на використанні аналізаторів спектра, за допомогою яких визначається ширина смуги спектра частот випромінювань на заданому в децибелах рівні потужності. Непрямі методи засновані на існуючій залежності ширини робочої смуги частот вимірюваного випромінювання від різних непрямих параметрів РЕЗ, таких як:

- швидкість убування позаполосних спектрів;
- час встановлення маніпуляційних сигналів;
- девіація частоти.

Тобто параметрів, що можуть бути обмірювані безпосередньо з більш високою точністю, чим займана перешкодою смуга частот.

Потужність і частоту завдовгих випромінювань можна вимірити за допомогою вимірювальних антен, вимірювальних приймачів і інших пристроїв, що перетворюють обмірювану потужність у величину, зручну для реєстрації, і контролюючих несучу центральну частоту прийнятого ВЧ сигналу.

До методів контролю ВЧ параметрів РЕЗ, що визначають їхню сприйнятливість до впливу ПЕМВ, варто віднести *вимір чутливості* радіоприймача. *Чутливість* радіоприймача є функцією від несучої частоти електромагнітного поля і визначається шляхом вимірювання потужності чи напруги сигналу на вході приймача та на виході приймача. При цьому

вимірюванні контролюється, щоб відношення $U_c/(U_{in}+U_n)$ не було менше паспортного значення.

Частотна вибірковість радіоприймача може бути обмірювана одно- чи багатосигнальним методом, методом блокування та ін. Сприйнятливість РЕЗ до ПЕМВ, що поширюється по ланцюгах живлення, кількісно визначається відношенням рівня перешкод у ланцюгах живлення до рівня перешкод на вході приймача за умови, що і ті й інші перешкоди створюють на виході радіоприймача однакову напругу.

Перехідні процеси в різних ланцюгах РЕЗ найчастіше контролюються амплітудно-часовими методами за допомогою електронних осцилографів, в основному запам'ятовуючих. При цьому, як правило, аналізуються наступні характеристики перехідного процесу:

- максимальне значення імпульсу U_{max} ;
- тривалість фронту імпульсу (час наростання фронту від $0,3 U_{max}$ до $0,9 U_{max}$);
- тривалість перехідного процесу на рівнях $0,5 U_{max}$ або $0,1 U_{max}$.

Набір перерахованих даних є достатнім для одержання залежності поточного значення перехідного процесу від часу, використовуваного надалі для уточнення математичної моделі взаємодії РЕЗ з ПЕМВ.

Точність оцінки вищенаведених характеристик перехідного процесу визначається головним чином типом використовуваного приладу, що реєструє. В табл. 2 наведені параметри деяких типів українських запам'ятовуючих осцилографів, використовуваних у складі контрольних-вимірювальних стендів.

Таблиця 2

Технічні характеристики деяких типів запам'ятовуючих осцилографів

Тип	Смуга пропускання, МГц	Швидкість запису, км/з	Розгорнення	Вхідні параметри	Габаритні розміри, мм; маса, кг	Примітка
1	2	3	4	5	6	7
38-7А (однопроменевий)	0...20	1000	50 нс/діл ... 5 з/діл	0,5 МОм 55 пф	350x450x770 50	–
38-12 (однопроменевий)	$5-10^{-6}$...0,1 0...10 0...50 $0...3,5-10^3$	4000	(0,1...5) мкс/діл (0,1...0,5) с/діл	1 МОм 30 пф	480x215x496 27	Зі змінними блоками
38-9А (однопроменевий)	0...2	120	0,05 мкс/см ... 0,6 с/см	0,5 МОм 45 пф	265x560x380 36	Чутливість по вертикалі 100 мВ/см... 10 В/см
С8-1S (однопроменевий, портативний)	0...10	1000	0,05 мкс/діл ... 0,5 з/діл	1 МОм 43 пф	180x300x480 16	Чутливість по вертикалі 2 мВ/дел... 5 В/дел
38-18 (однопроменевий)	0...10	250	0,05 мкс/діл ... 1 з/діл	–	330x177x500 16	Чутливість по вертикалі 1 мВ/дел ... 5 В/дел

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7
38-2 (двопроменевий)	0...7	500	0,05 мкс/діл ... 25 з/діл	0,5 МОм 55 пф	670x1225x485 81	–
38-17 (двопроменевий)	0...1	540	0,2 мкс/діл ... 25 з/діл	1 МОм 42 пф; з дільником 1 МОм 12 пф	300x180x480 16	Чутливість по вертикалі 1 мВ/дел ... 5 В/дел, час відтворення 30 хв, час збереження 5 діб

Основними параметрами, що визначають можливість використання того чи іншого типу осцилографа, є швидкість і вірогідність відтворення досліджуваного сигналу. Ці параметри залежать від частотних властивостей осцилографа, а також точності відліку, яка залежить від параметрів електронно-променевої трубки і вхідних підсилювачів.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Сильною стороною у проведеному дослідженні є можливість оцінювати ступінь дії ПЕМВ на різні вузли та усю РЕЗ відокремленими параметрами. А саме, параметрами, які характеризують заводську обстановку, створювану самими вузлами РЕЗ, і параметрами, що характеризують ступінь сприйнятливості різних частин (вузлів) РЕЗ до впливу ПЕМВ.

Weaknesses. Слабкою стороною є те, що у роботі відсутній практичний приклад розробки конкретного стійкого до ПЕМВ РЕЗ (або окремого блоку). Однак результати проведеного дослідження дозволяють зрозуміти порядок, умови експериментальних випробовувань та вимоги до КВА. Це дозволить у наступних дослідженнях оцінити стійкість як окремого блоку, так і РЕЗ у цілому.

Opportunities. Сформульовані загальні умови дозволяють у подальших дослідженнях вивчити стійкість конкретного РЕЗ до дії ПЕМВ як на етапі розробки, так і етапах його випробування з використанням контрольно-вимірювальної апаратури, вимоги до якої також були сформульовані у роботі.

Дана методика дозволить виявити електромагнітноуразливі прибори (вузли, блоки, елементи) та прийняти рішення розробникам РЕЗ щодо побудови електромагнітного захисту з урахуванням сучасних технологій. Однак слід зауважити, що зовсім виключити проникнення електромагнітного випромінювання до радіотехнічних систем, і особливо через АФТ поки неможливо.

Threats. Загрозами для результатів проведених досліджень є те, що для розрахунку перелічених показників не слід використовувати однакові підходи та методи в силу різного функціонального призначення та складу РЕЗ. Крім того, зазначені у роботі підходи до визначення методів дослідження впливу ПЕМВ на РЕЗ, слід перевіряти на вірогідність зазначеними у посиланнях способами, у тому числі засобами програмних комплексів AWR, CST, HFFS, MMANA та інші.

Витрати на такі експериментальні випробування слід враховувати на етапі розробки РЕЗ. Це дасть можливість не тільки мінімізувати (до 60 %) вплив на радіоелектронний засіб ПЕМВ, а і по можливості (обмеженість технологій, наявність у РЕЗ антен та інших шляхів проникнення ПЕМВ, розвиток електромагнітної зброї) не допустити теплового електромагнітного ураження РЕЗ ПЕМВ.

8. Висновки

1. Показано, що основні параметри, які визначають стійкість РЕЗ і підлягають контролю при впливі ПЕМВ, в основному визначаються радіоприймальним пристроєм і пристроями обробки цифрової інформації. Так, канал радіоприйому корисного сигналу характеризується:

- чутливістю $P_{c.min}$;
- частотною вибірковістю (смуга пропущення, коефіцієнт прямокутності АЧХ);
- нестабільністю частоти гетеродина приймача;
- внутрішніми шумами вхідних каскадів приймача;
- нелінійністю характеристик застосовуваних у приймачі підсилювачів і змішувачів, що є причиною розширення спектра прийнятого сигналу.

Крім того, характеристика, що дозволяє судити про сприйнятливість РЕЗ по каналу прийому корисного сигналу, це відношення:

$$U_c / (U_{ш} + U_n),$$

де U_c , $U_{ш}$, U_n – відповідно, напруги корисного сигналу, шуму і перешкоди на вході приймача. Для нормального прийому корисного сигналу з потужністю P_c повинна задовольнятися умова $P_c > P_{c.min}$. На рівень сприятливості також впливають характеристики АФТ до прийомного тракту, а саме:

- ширина головного пелюстка ДС;
- рівні бічних пелюстків ДС АФТ;
- коефіцієнт спрямованої дії;
- ефективна площа антени S_{ef} ;
- поляризаційні параметри антени.

2. Визначено, що до особливостей методів випробувань, пов'язаних з визначенням стійкості РЕЗ до, під час і після впливу ПЕМВ, відносяться:

- широкий діапазон частот як корисних сигналів, так і перешкод;
- випробування РЕЗ у ближній зоні впливу ПЕМВ;
- вимір статистичних параметрів ПЕМВ;
- вимір наведень у різних ланцюгах РЕЗ при впливі ПЕМВ;
- проведення математичної обробки результатів виміру з метою розробки рекомендацій, що дозволяють підвищити завадостійкість РЕЗ;
- пошук і реалізація при розробці КВА нових конструкторських і технологічних рішень, що забезпечують більш високий ступінь вірогідності одержуваних результатів у більш короткі проміжки часу;
- розробка нових більш завадостійких видів зв'язку між окремими частинами КВА і досліджуваними РЕЗ при створенні вимірювальних стендів.

3. У результаті проведених досліджень сформовано задачі, які виникають

при оцінці стійкості РЕЗ:

- визначення характеристик електричної і магнітної складових полів ПЕМВ, що впливають на РЕЗ;
- визначення напруг і струмів, що наводяться, у ланцюгах РЕЗ і на міжблочних лініях зв'язку в результаті дії ПЕМВ;
- визначення зміни форми вихідних сигналів і режимів роботи окремих елементів, схем і пристроїв РЕЗ під час і після впливу ПЕМВ на РЕЗ;
- виявлення елементів, блоків, пристроїв РЕЗ, найбільш критичних до впливу ПЕМВ.

4. У результаті досліджень доведено, що запропонована схема контрольно-випробувального стенда для проведення комплексних випробувань РЕЗ на стійкість до впливу ПЕМВ у своєму складі повинна мати КВА з запам'ятовуваними осцилографами, характеристики яких наводяться у роботі.

Надані рекомендації щодо проведення експериментальних досліджень стійкості РЕЗ до ПЕМВ наявною КВА у складі контрольно-випробувального стенда:

- контроль стійкості РЕЗ до впливу ПЕМВ складається з двох основних етапів. На першому контролюються параметри РЕЗ, що впливають на їхню електромагнітну сумісність, до впливу на РЕЗ ПЕМВ, а потім ті ж самі виміри проводяться після впливу ПЕМВ. Другий етап контролю – це є оцінка стійкості РЕЗ під час впливу ПЕМВ. Такий спосіб контролю більш об'єктивний, хоча його проведення пов'язане з низкою серйозних труднощів;

- для контролю сигналів у високочастотних трактах РЕЗ під час впливу ПЕМВ, а також виникаючих при цьому перехідних процесів у ланцюгах апаратури в більшості випадків необхідно використовувати спектральні методи, які можна розділити на прямі і непрямі. Прямі спектральні методи виміру засновані на використанні аналізаторів спектра. Непрямі методи засновані на існуючій залежності ширини робочої смуги частот вимірюваного випромінювання від різних непрямих параметрів РЕЗ, таких як швидкість змін позасмугових спектрів, час встановлення маніпуляційних сигналів, девіація частоти. Тобто параметрів, що вимірюються безпосередньо з більш високою точністю, чим займана перешкодою смуга частот;

- до контрольно-вимірювальної апаратури, використовуваної для контролю стійкості РЕЗ під час впливу ПЕМВ, слід пред'являти ряд додаткових твердих технічних вимог. Одним зі шляхів задоволення цих вимог є виведення системи контрольованих сигналів із зони впливу ПЕМВ. У загальному випадку це може бути здійснене за допомогою виведення з зони експерименту передавального і прийомного пристроїв, а також лінії зв'язку.

Література

1. Izmeritel'nyy kompleks dlya issledovaniya elektromagnitnoy obstanovki pri rasprostraneniі sverkhkorotkikh elektromagnitnykh impul'sov v pomeshheniyakh zdaniya / Sakharov K. Yu. et. al. // Tekhnologii EMS. 2009. Issue 3 (30). P. 18–22.
2. White Donald R. J. A Handbook on Electromagnetic Interference and Compatibility. Gainesville: Don White Consultants, 1987. 870 p.

3. Barsukov V. S. Kompleksnaya zashhita ot elektromagnitnogo terrorizma // *Sistemy bezopasnosti svyazi i telekommunikatsiy*. 2000. Issue 32. P. 94–98.
4. Balyuk N. V., Kechiev L. N., Stepanov P. V. Moshhnyy elektromagnitnyy impul's: vozdeystvie na elektronnye sredstva i metody zashhity. Moscow: OOO «Gruppa IDT», 2007. 478 p.
5. Fyk A. I., Ol'khovikov S. V. Metodika otsenki sostoyaniya vkhodnykh tsepey radiopriyomnykh ustroystv pri vozdeystvii elektromagnitnogo impul'sa yadernogo vzryva // *Sistemy obrobky informatsii*. 2005. Issue 5 (21). P. 170–178.
6. Larionenko A. V., Simakin S. V. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy vozdeystviya sverkhshirokopolosnykh elektromagnitnykh impul'sov na elementy telekommunikatsionnykh sistem // *Tekhnologii EMS*. 2009. Issue 3 (30). P. 33–37.
7. Kravchenko V. I., Bolotov E. A., Letunova N. I. Radioelektronnye sredstva i moshhnye elektromagnitnye pomekhi / ed. Kravchenko V. I. Moscow: Radio i svyaz', 1987. 256 p.
8. Bogdanov V. N., Zhukovskiy M. I., Safronov N. B. Sistema natsional'nykh standartov po zashhite informatsii ot prednamerennykh elektromagnitnykh vozdeystviy // *Tekhnologii EMS*. 2009. Issue 1 (28). P. 23–28.
9. Akbashev B. B., Balyuk N. V., Kechiev L. N. Zashhita ob"ektov telekommunikatsiy ot elektromagnitnykh vozdeystviy. Moscow: Grifon, 2014. 472 p.
10. DSTU EN 55014-1:2016 (EN 55014-1:2006; EN 55014-1:2006/A1:2009; EN 55014-1:2006/A2:2011, IDT). Elektromagnitna sumisnist. Vymohy do pobutovykh elektropryladiv, elektrychnykh instrumentiv ta analohichnoi aparatury. Chastyna 1. Emisiia zavrad. Kyiv: DP «UkrNDNTs», 2017. 94 p.
11. DSTU3680-98 (HOST 30586-98). Sumisnist tekhnichnykh zasobiv elektromagnitna. Metody zakhystu. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 1999. 10 p.
12. Walling E. M. High Power Microwaves: Strategic and Operational Implications for Warfare. Occasional Paper No. 11. Center for Strategy and Technology/Air War College/Air University/Maxwell Air Force Base. Alabama, 2000. 52 p. doi: <http://doi.org/10.21236/ada425472>
13. Geis J. P. Directed Energy Weapons on the Battlefield a New Vision for 2025. Occasional Paper No. 32/Center for Strategy and Technology/Air War College/Air University/ Maxwell Air Force Base. Alabama, 2003. 73 p. doi: <http://doi.org/10.21236/ada463429>
14. Gizatullin Z. M. Tekhnologiya prognozirovaniya i povysheniya elektromagnitnoy sovместimosti tsifrovyykh elektronnykh sredstv pri vneshnikh vysokochastotnykh impul'snykh elektromagnitnykh vozdeystviyakh // *Tekhnologii EMS*. 2010. Issue 3 (34). P. 22–29.
15. Camp M., Nitsch D., Sabath F. Susceptibility of Electronic Equipment to HEMP Threats // *System Design and Assessment Notes*. Notes 37. 2004. 17 p.
16. Baker G., Castillo J. P., Vance E. F. Potential for a unified topological approach to electromagnetic effects protection // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1992. Vol. 34, Issue 3. P. 267–274. doi: <http://doi.org/10.1109/15.155839>
17. Tesche F. Topological concepts for internal EMP interaction // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1978. Vol. 26, Issue 1. P. 60–64. doi: <http://doi.org/10.1109/tap.1978.1141785>