

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

(позначення документа)

Аналіз електромагнітних впливів на інформаційні системи і мережі.

(тема)

Виконав:

студент 6 курсу, групи МНПм-19-1

Ємцов Н. П.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна
техніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Мікро- та наноелектронні
прилади і пристрої.

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Бондаренко І.М.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Бондаренко І.М.

(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та Біомедичної інженерії

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 153 мікро- та наносистемна техніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма мікро- та наноелектронні прилади та пристрої
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Ємцову Нікіті Павловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз електромагнітних впливів на інформаційні системи і мережі.

затверджена наказом по університету від 06 листопада 2020 р. № 1560ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз можливих електромагнітних впливів на існуючі інформаційні системи і мережі. Оцінити найбільш критичні щодо не викривленої передачі сигналів та режимів функціонування.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1. Походження та класифікація електромагнітних впливів. Електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів і систем.

2. Методи і засоби аналізу та оцінки ступеню електромагнітних впливів.

3. Виявлення найбільш критичних впливів для інформаційних систем і мереж (на прикладі конкретної системи).

4. Запропонувати методи захисту або зменшення електромагнітних впливів що заважають

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____

У роботі використовується комп'ютерна презентація на десять (10) слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд	25.07 — 26.08	
2	Огляд літератури	26.08 — 11.09	
3	Теоретичне обґрунтування	11.09 — 30.11	
4	Пояснювальна записка	30.11 — 08.12	

Дата видачі завдання 25 серпня 2020 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ зав. каф. МЕЕПІ Бондаренко І.М.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи магістра містить: 51 сторінку, 12 рисунків, 2 додатка, 3 таблиці, 17 джерел.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ЗАВАДА, ВИМІРЮВАННЯ, ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЗАВАДИ, КЛАСИФІКАЦІЯ

Об'єкт дослідження — Електромагнітна сумісність електронних засобів і систем

Мета роботи — проведення аналізу впливів електромагнітних завад на роботу електронних систем та методів їх визначення і вимірювання.

Актуальність роботи — необхідність підвищення завадостійкості інформаційних систем та мереж.

Метод дослідження — теоретичний метод дослідження. Аналіз статей та праць за цією темою

Опис розділів:

У першому розділі дана загальна інформація про електромагнітну сумісність, класифікацію та види завад в апаратурі.

У другому розділі описані джерела завад, методи та засоби їх вимірювання

У третьому розділі наведено опис електромагнітних завад в апаратурі спеціального призначення та напрямки зменшення їх впливу.

ABSTRACT

The explanatory note of the master's degree attestation work contains: 51 pages, 12 figures, 3 additions, 3 tables, 17 sources.

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE, MEASUREMENT, RADIATION, INTERFERENCE, CLASSIFICATION

Object of research — Electromagnetic compatibility of electronic means and systems

Purpose — Analysis of the effects of electromagnetic interference on the operation of electronic systems and methods for their determination and measurement.

The urgency of the work — the need to increase the noise immunity of information systems and networks.

Research method — Theoretical research method. Analysis of articles and works on this topic

Description of sections:

The first section provides general information on electromagnetic compatibility, classification and types of interference in equipment.

The second section describes the sources of interference, methods and means of measuring them

The third section describes the electromagnetic interference in special equipment and ways to reduce their impact.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка аттестационной работы магистра содержит: 51 страниц, 12 рисунков, 3 приложения, 3 таблицы, 17 источников.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПОМЕХА, ИЗМЕРЕНИЕ, ИЗЛУЧЕНИЯ, ПОМЕХА, КЛАССИФИКАЦИЯ

Объект исследования — электромагнитная совместимость электронных средств и систем

Цель работы — проведение анализа воздействий электромагнитных помех на работу электронных систем и методов их определения и измерения.

Актуальность работы — необходимость повышения помехоустойчивости информационных систем и сетей.

Метод исследования — теоретический метод исследования. Анализ статей и трудов по этой теме

Описание разделов:

В первом разделе дана общая информация об электромагнитной совместимости, классификацию и виды помех в аппаратуре.

Во втором разделе описаны источники помех, методы и средства их измерения

В третьем разделе описаны электромагнитные помехи в аппаратуре специального назначения и направления уменьшения их влияния.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ	11
1.1 Вплив завад на роботу електронної апаратури	11
1.2 Походження та класифікація електромагнітних впливів	13
1.2.1 Природа електромагнітних завад	15
2 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ	21
2.1 Існуючі види завад та найбільш впливове до них обладнання	21
2.2.1 Кондуктивно-електромагнітні перешкоди	24
2.2.2 Випромінюванні електромагнітні перешкоди	26
2.2 Засоби виміру	31
2.3 Найбільш вірогідні джерела завад	36
2.3.1 Випромінювання кабелів	37
2.3.2 Металева шасі і корпус	38
2.3.3 Стики	39
2.4 Методи та засоби усунення або зменшення впливу завад	40
2.4.1 Рішення 1	43
2.4.2 Рішення 2	44
3 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЗАВАДИ В АПАРАТУРІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	45
3.1 Аналіз електромагнітних завад	45
3.2 Усунення завад та захист військової та аерокосмічної апаратури	47
ВИСНОВКИ	49
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	50
ДОДАТОК А	52
ДОДАТОК Б	53

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

EMC — Електромагнітна сумісність

IoT — Інтернет речей

ЕМЯ — Електромагнітне явище

ITE — Information Technology Equipment

CRISP — Comite International Special des Perturbations Radioelectriques

ЕПОМ — Еквівалент Повного Опору Мережі

LISN — Line Impedance Stabilization Network

AMN — Artificial Mains Network

OATS — Open Area Test Site

SAC — Semi Anechoic Chamber

НВЧ — Надвисокі частоти

ESD — Electro Static Discharge

ВСТУП

В даний час бачимо експоненціальне зростання застосування електронного обладнання, велика частина якого має вбудовані перетворювачі енергії, генератори, передавачі та приймачі. Це і прилади для самого широкого споживання, і пристрої, що безпосередньо впливають на наше життя і безпеку. Крім того, спостерігається бурхливий розвиток рішень технології «Інтернету речей» (IoT), поступово змінюють звичну нам середу.

З ростом кількості пристроїв, заснованих на передачі радіосигналів, виробникам стає вкрай складно забезпечити їх працездатність без урахування впливу електромагнітного випромінювання одного обладнання на функціонування іншого. Звідси випливає, що подібні пристрої необхідно розглядати з такої важливої точки зору, як генерація ними електромагнітних завад і стійкість самого обладнання до зовнішнього впливу випромінювання від інших приладів [1].

Так що якщо ви розробник або постачальник електричного, або електронного обладнання, то у вашого продукту завжди є вимоги щодо електромагнітної сумісності (ЕМС), відображені в його технічних характеристиках (специфікації або технічних умовах). Вони можуть витікати з стандартів, яким повинні відповідати вироби що випускаються, інакше їх просто не можна буде продавати на ринку.

Іноді клієнт включає своє бачення цієї проблеми в технічне завдання на розробку продукту або замовлення на поставку (проте для ринкових виробів зменшити встановлені вимоги замовник не має права). Слід пам'ятати, що виконання вимог щодо електромагнітної сумісності, як і стандартів з безпеки, обов'язково і контролюється відповідними органами з сертифікації конкретного виду продукції. Недотримання регламентів по ЕМС можливо лише в тому випадку, якщо це макет або дослідний зразок, виріб спеціального призначення, одиночна продукція, яка не призначена для продажу, та рішення, розроблені не

для ринку, а поставка яких здійснюється за окремими контрактами з обумовленими умовами і ризиками замовника.

ЕМС або електромагнітна сумісність (Electro Magnetic Combatibility, англ.) — термін, який вказує на здатність певного виду обладнання працювати в межах заданих параметрів в умови періодичного або постійного зовнішнього впливу навколишнього середовища, і водночас не впливати на справність і безперебійність роботи інших приладів електрообладнання, розташованих в зоні можливого впливу.

Електромагнітна сумісність — це сучасний термін, поняття, яке об'єднує цілий ряд найбільш поширених електромагнітних явищ (ЕМЯ), а саме:

- перешкоди в радіомережі;
- вплив перенапруги на мережі;
- коливання напруги електронної мережі;
- впливи, створювані електромагнітним полем;
- так звані «паразитні зв'язки»;
- фон, який створюється при роботі об'єктів промисловості (частота 50 Гц);
- вплив у місцях установки заземлюючих пристроїв [2].

1 ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ

1.1 Вплив завад на роботу електронної апаратури

Випробування по ЕМС можна розділити на дві великі категорії. Це власне випромінювання, або наводка електромагнітних завад (в стандартах іменується «індустріальні радіоперешкоди», які діляться на ті, що наводяться або кондуктивні та ті, що випромінюються), і стійкість до впливу зовнішніх електромагнітних завад, або сприйнятливість, якщо це стосується військового і аерокосмічного обладнання. Завдання випробувань — встановити, скільки радіочастотної енергії випромінює продукт і який рівень його стійкості до зовнішніх електромагнітних впливів різного типу. Випробування на стійкість до електромагнітних завад проводяться для визначення того, чи буде продукт працювати належним чином, коли він піддається впливу різних джерел електромагнітної енергії в передбачуваних умовах експлуатації.

Вимоги стандартів по ЕМС постійно змінюються, причому у бік посилювання нормативів. Класичним прикладом може служити стандарт по регламентації індустріальних радіоперешкод для обладнання інформаційних технологій (англ. Information Technology Equipment, ITE), такий химерний термін для комп'ютерів і їх периферійних пристроїв встановлений стандартом CISPR 22 (український аналог — ДСТУ CISPR 22: 2007 Обладнання інформаційних технологій. Характеристики радіозавад. Норми та методи вимірювання). Саме назва CISPR є аббревіатурою від французького найменування Міжнародного комітету по радіоперешкода — Comite International Special des Perturbations Radioelectriques. Він, в свою чергу, є спеціальним комітетом — Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК). Ще однією суттєвою проблемою для виробника є не тільки дотримання конкретних вимог, що виходять за рамки міжнародних стандартів і прийнятих в тих країнах, де продукт повинен бути проданий, а й знання діючих версій стандарту для конкретного продукту. Щоб зрозуміти,

наскільки це важливо для сучасної електроніки, слід оцінити хоча б загальне число існуючих стандартів, присвячених даній тематиці. Стандарти будуть розвиватися і замінюватися. І як і раніше накладати вимоги для продуктів з урахуванням їх специфіки та ринків збуту. Регламенти по ЕМС не зникнуть, а стануть тільки жорсткіше, і їх не можна ігнорувати, якщо ми хочемо просувати свій продукт на ринок. Крім того, слід постійно пам'ятати, що потрібно не тільки враховувати вимоги по ЕМС в уже розробленому кінцевому рішенні, а й приділяти цим непростим питанням найпильнішу увагу на етапі проектування, оскільки в своїй основі продукт повинен мати задану функціональність. Ринок не прощає втрат часу на доопрацювання виробів [3].

Проблема не нова, вона багатогранна і виходить за рамки обов'язкової сертифікації. Візьмемо, наприклад, звичайний смартфон, який містить кілька різних радіопристроїв: стільниковий телефон, Bluetooth, Wi-Fi, GPS, FM-приймач тощо. Плюс цифрові схеми, які повинні функціонувати з працюючими передавачами і при цьому самим не генерувати неприпустимий рівень перешкод. Вирішення питань з місткості тут повністю лежить на совісті розробника. Дані аспекти поки (ще тільки поки) не підпадають під вимоги нормативних документів, але якщо ваш продукт не зможе належним чином функціонувати, поєднуючи всі можливі джерела випромінювань і їх приймачі, то подібний виріб, швидше за все, не буде успішним на ринку навіть при мінімальній по відношенню до конкурентних товарів вартості.

Дана робота присвячена не окремим аспектам ЕМС по конкретному типу продукції, яким зазвичай приділяється увага, а загальним проблемам того, що означає і приховує в собі перевірка на виконання вимог по ЕМС. Тут не є самоціллю розгляд вузьких питань елементів фільтрації ЕМП, екранування і використання випробувального обладнання — про це йдеться досить часто і важливість такої інформації не потрібно недооцінювати.

Буде запропоновано поглянути на проблему ЕМС з іншого ракурсу та ознайомитися з особливостями випробувань обладнання комерційного, призначення, а також дізнатися, як підготувати обладнання і себе до таких

випробувань і усунути проблеми, що виникають при тестуванні виробів в сертифікованій лабораторії ЕМС. Крім того, буде приділено увагу аналізу та управління ризиками ЕМС.

1.2 Походження та класифікація електромагнітних впливів

Основними характеристиками електромагнітного випромінювання прийнято вважати частоту, довжину хвилі і поляризацію.

Довжина хвилі прямо пов'язана з частотою через (групову) швидкість поширення випромінювання. Групова швидкість поширення електромагнітного випромінювання у вакуумі дорівнює швидкості світла, в інших середовищах ця швидкість є меншою. Фазова швидкість електромагнітного випромінювання у вакуумі також дорівнює швидкості світла, у різних середовищах вона може бути як меншою, так і більшою від швидкості світла.

У неоднорідному середовищі спостерігаються явища відбивання, заломлення, дифракції та інтерференції електромагнітних хвиль.

Електромагнітне випромінювання прийнято розділяти за частотними діапазонами (таблиця 1.1). Між діапазонами немає чітких переходів, іноді вони перекриваються, а межі між ними є умовними. Оскільки швидкість поширення випромінювання (у вакуумі) стала, то частота його коливань жорстко пов'язана з довжиною хвилі у вакуумі.

Радіохвилі. Ультракороткі радіохвилі прийнято поділяти на метрові, дециметрові, сантиметрові, міліметрові й субміліметрові (мікрометрові). Хвилі довжиною $\lambda < 1$ м ($\nu > 300$ МГц) прийнято також називати мікрохвилями або хвилями надвисоких частот (НВЧ).

Таблиця 1.1 — Класифікація електромагнітних впливів

Назва діапазону		Довжини хвиль, λ	Частота, ν	Джерела випромінювання
Радіохвилі	Наддовгі	Понад 10км	До 30кГц	Атмосферні та магнітосферні явища. Радіозв'язок.
	Довгі	10км – 1км	30кГц – 300кГц	
	Середні	1км – 100м	300кГц – 3МГц	
	Короткі	100м – 10м	3МГц – 30МГц	
	Ультракороткі	10м – 1мм	30МГц – 300ГГц	
Інфрачервоне випромінювання		1мм – 780нм	300ГГц – 429ГГц	Вивчення молекул і атомів при теплових та електричних впливах.
Видиме випромінювання		780нм – 380нм	429ГГц – 750ГГц	
Ультрафіолетові		380нм – 10нм	$3 \cdot 10^{14}$ Гц – $3 \cdot 10^{16}$ Гц	Випромінювання атомів під впливом прискорених електронів.
Рентгенівські		10нм – 5пм	$3 \cdot 10^{16}$ Гц – $6 \cdot 10^{19}$ Гц	Атомні процеси при впливі прискорених заряджених частинок.

Продовження таблиці 1.1

Назва діапазону	Довжини хвиль, λ	Частота, ν	Джерела випромінювання
Гамма	До 5пм	Понад $6 \cdot 10^{19}$ Гц	Ядерні і космічні процеси, радіоактивний розпад.

Іонізаційне електромагнітне випромінювання. До цієї групи традиційно відносять рентгенівське і гамма-випромінювання, хоча, іонізувати атоми може й ультрафіолетове випромінювання, і навіть видиме світло. Межі областей рентгенівського й гамма-випромінювання можуть бути визначеними лише досить умовно. Для загальної орієнтації можна прийняти, що енергія рентгенівських квантів лежить у межах 20 еВ — 0.1 МеВ, а енергія гамма-квантів — вище від 0.1 МеВ. У вузькому розумінні гамма-випромінювання здійснюється ядром, а рентгенівське — атомною електронною оболонкою при вибиванні електрона з низькорозташованих орбіт, хоча ця класифікація незастосовна до жорсткого випромінювання, що генерується без участі атомів і ядер (наприклад, синхротронного чи гальмівного випромінювання) [4].

1.2.1 Природа електромагнітних завад.

Електромагнітні завади виникають внаслідок природних явищ або як результат технічних процесів. Прикладами природних перешкод можуть служити атмосферні розряди (електромагнітні імпульси, що виникають при ударі блискавки) або електростатичні розряди (Electro Static Discharge — ESD). Останні мають особливо велике значення в напівпровідниковій електроніці. У промисловому обладнанні основним джерелом перешкод є процеси перемикання в електричних ланцюгах, пов'язані з дуже швидкою зміною струмів і напруги, що, в свою чергу, веде до появи електромагнітних завад, які можуть бути періодичними або випадковими. Вплив цих перешкод може носити як

кондуктивний (у вигляді наведення на струми або напруги в провідниках), так і радіаційний (під впливом змінного електромагнітного поля) характер.

Тип кондуктивної завади, коли наведений в провідниках струм має знак, тобто з однаковою амплітудою протікає як в прямому, так і в зворотному напрямку, називається симетричною, або диференціальною, перешкодою. Якщо струм перешкоди замикається на землю або протікає по провіднику в одному напрямку, то така перешкода називається асиметричною, або синфазною.

Електромагнітна зв'язок між джерелом і приймачем перешкод може виникати в результаті: гальванічного зв'язку (найбільш поширений випадок), яка створює симетричні перешкоди; ємнісний зв'язку, що виникає в результаті впливу змінного електричного поля на паразитні конструктивні ємності; індуктивного зв'язку, викликаного перебуванням провідника, по якому тече струм, в змінному магнітному полі; електромагнітного зв'язку, яка може мати кондуктивний характер (виникає як наводка на провідники в кабельних джгутах або на провідні доріжки друкованої плати) або поширюється шляхом випромінювання (якщо ширина зазору між джерелом і приймачем перешкоди перевищує 0.1 довжини хвилі випромінювання λ).

Напівпровідникові ключі, логічні інтегральні схеми, мікроконтролери є джерелом широкосмугових перешкод, викликаних внутрішніми процесами в цих пристроях і роботою тактових генераторів. Сигнали зазначених перешкод мають періодичний характер і можуть бути «розкладені» в частотний спектр за допомогою перетворення Фур'є. Нижче в даному розділі наведені апроксимовані вираження, які можна використовувати при розрахунку амплітуд і частот зламу для трапецеїдальних сигналів. Приклад такого сигналу показаний на рисунку 1.1, а відповідна йому апроксимуюча огинаюча спектра представлена на рисунку 1.2. Від основної частоти сигналу до першої з частот зламу f_{g1} графік спектральної залежності амплітуди сигналу від частоти йде паралельно осі частот. На ділянці між першою і другою (f_{g2}) частотами зламу амплітуда зменшується з крутизною 20 дБ/дек, а на останній ділянці — з крутизною 40 дБ/дек.

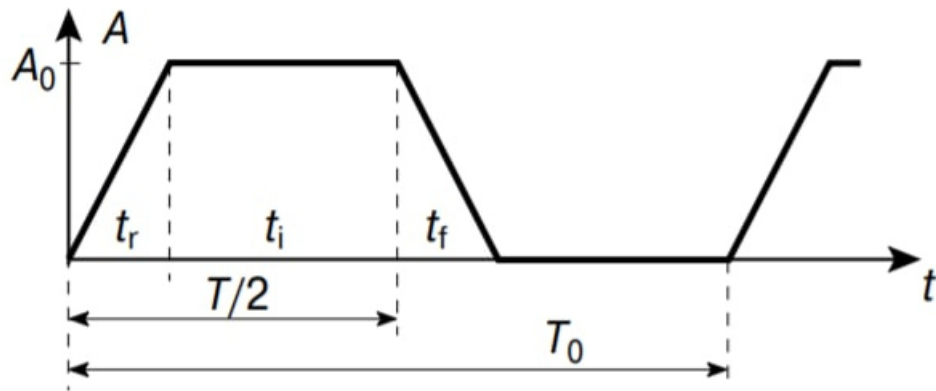


Рисунок 1.1 — Подання процесу перемикання сигналів у вигляді трапецеїдальної функції

У наведених нижче формулах можуть використовуватися такі символи:

A_0 — амплітуда вихідного сигналу;

A_n — амплітуда n -й гармоніки;

T_0 — період основної частоти сигналу;

t_i — тривалість імпульсу;

t_s — час перемикання ($t_r = t_f$);

n — номер гармоніки основної частоти;

n_{g1} — номер гармоніки частоти 1го зламу;

n_{g2} — номер гармоніки частоти 2го зламу;

f_0 — основна частота;

f_{g1} — частота 1-го зламу;

f_{g2} — частота 2-го зламу.

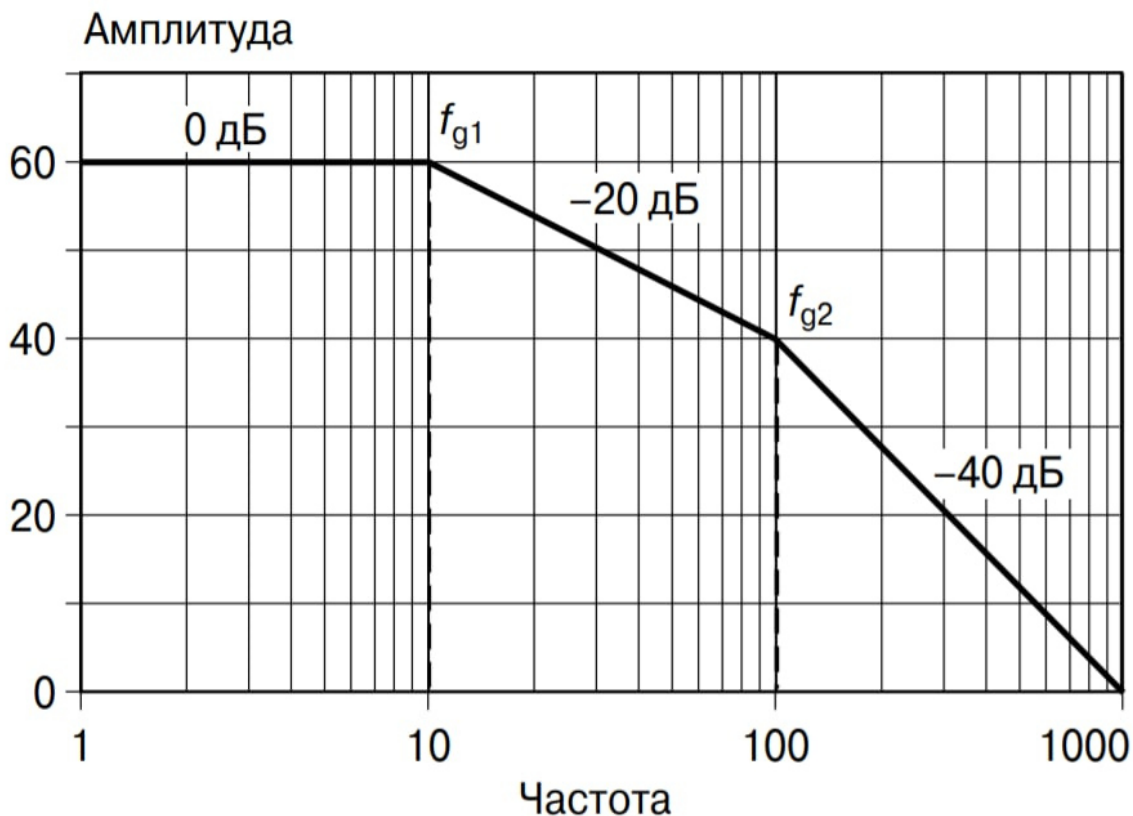


Рисунок 1.2 — Форма огинаючої спектральної характеристики

На першій ділянці спектра в діапазоні частот $f_0 \dots f_{g1}$ амплітуда сигналу не залежить від частоти:

$$A_n \approx \frac{2 \cdot A_0 \cdot t_i}{T_0} \quad (1)$$

На другій ділянці в діапазоні частот $f_{g1} \dots f_{g2}$ амплітуда сигналу падає з крутизною 20 дБ на декаду:

$$f_{g1} = \frac{1}{\pi \cdot t_i} \quad (2)$$

$$A_n \approx A_0 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{n} \quad (3)$$

На третій ділянці (частота вище f_{g2}) амплітуда сигналу падає з крутизною 40 дБ на декаду:

$$f_{g2} = \frac{1}{\pi \cdot t_s} \quad (4)$$

$$A_n \approx A_0 \cdot \frac{2}{\pi^2} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \frac{T_0}{t_s} \quad (5)$$

Вимірювання електромагнітного випромінювання. Вимірювання електромагнітного випромінювання проводяться в частотній області за допомогою тестового приймача або аналізатора спектра. Дані прилади дозволяють здійснювати оцінку різних характеристик перешкод шляхом вимірювання їх пікового, квазіпікового, середнього або ефективного значення. При цьому виміри проводяться щодо певного рівня, що дозволяє здійснювати зручну індикацію при вимірі фізичних величин від мкВ до В. Показання приладу відповідають логарифмічному відношенню амплітуди сигналу до опорного значення (це опорне значення в техніці зв'язку прийнято називати ефективною потужністю або потужністю перешкод). Рівень потужності визначається як помножений на десятичний логарифм відношення потужності вимірюваного сигналу до ефективної потужності і виражається в децибелах:

$$p = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_x}{P_0}, \text{ дБ} \quad (6)$$

У техніці зв'язку прийнято вважати, що величина опорної (ефективної) потужності P_0 становить 1 мВт. Щоб підкреслити це, до одиниці виміру рівня потужності додається буква «м» (дБм, тобто децибели, відлічувані щодо рівня 1 мВт). Рівень напруги або напруженості поля, отриманий в ході вимірювання електромагнітного випромінювання, має розмірність дБмкВ або дБмкВ/м відповідно, а формула для нього може бути виведена з виразу для рівня

потужності. Величиною 0 дБмкВ відповідає опорне значення 1 мкВ. Отже, для систем з хвильовим опором 50 Ом виміряне значення рівня потужності 0 дБм відповідає рівню напруги 107 дБмкВ.

$$\text{дБмкВ} = 20 \log_{10} \cdot \left(\frac{V_{\text{вих}}}{1 \text{ мкВ}} \right), \quad (7)$$

$$\text{дБм} = 10 \log_{10} \cdot \left(\frac{P_{\text{вих}}}{1 \text{ мкВт}} \right), \quad (8)$$

Формула для рівня напруги [5]:

$$p = 20 \cdot \log \frac{U_x}{U_0}, \text{ дБмкВ} \quad (9)$$

2 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ

2.1 Існуючі види завад та найбільш впливові до них обладнання

Випробування виробів на виконання вимог щодо електромагнітної сумісності (ЕМС) охоплюють широкий спектр різноманітного електричного і електронного обладнання комерційного призначення. Основні обмеження накладаються як на рівні електромагнітного випромінювання в залежності від типу електромагнітних завад, так і на рівні стійкості до їх впливу.

Цікавлять загальні вимоги щодо електромагнітної сумісності (ЕМС) для продуктів комерційного ринку. Тобто для виробів масового застосування, таких як обладнання інформаційних технологій (комп'ютери і їх периферійні пристрої), побутова техніка, світильники, електроінструменти та широкий спектр інших виробів чисто комерційного спрямування. Особливе місце в цьому ряду займають прилади медичного призначення та електронне обладнання для автомобілів, що пов'язано з підвищеними потенційними ризиками при некоректному функціонуванні подібних продуктів.

Стандарти, що регламентують вимоги щодо ЕМС на конкретний тип обладнання, включають обмеження на граничні рівні індустриальних радіоперешкод, містять методи випробувань і нормативи для випробувального обладнання. Вимоги можуть відрізнятися, наприклад, для медичного і автомобільного устаткування вони гранично посилені. Проте всі стандарти в частині випробувань на виконання вимог по ЕМС комерційного призначення мають кілька спільних рис і підпадають під міжнародні стандарти серії ІЕС 61000 і CISPR. У більшості цих стандартів є національні аналоги або в автентичному перекладі, або з урахуванням національних вимог.

Відповідність виробів комерційного спрямування вимогам стандартів по ЕМС, як і стандартів з безпеки, є обов'язковим, передбачає необхідну сертифікацію і контролюється спеціальними органами.

Випробування на ЕМС мають на увазі перевірку на рівні індустріальних радіоперешкод (і пов'язані з ними обмеження) і застосовуються для комерційного обладнання, в першу чергу для забезпечення захисту каналів радіо- і телемовлення та інших служб радіозв'язку. Незважаючи на те, що до широкого виходу на ринок персональних комп'ютерів існувало певне число стандартів, що регламентували рівні електромагнітного випромінювання, саме поширення цифрового електронного устаткування стимулювало подальшу розробку подібних стандартів і правил. Це було пов'язано з великим числом скарг на перешкоди, безпосередньою причиною яких стали якраз нові для ринку пристрої.

Перші персональні комп'ютери були спроектовані і побудовані без урахування рівня їх власного радіочастотного випромінювання і, як наслідок, генерували електромагнітні поля високого рівня і в широкому частотному діапазоні. У загальному сенсі можна стверджувати, що перші персональні комп'ютери служили своєрідними широкосмуговими радіопередавачами, що маскуються під комп'ютери.

Комп'ютери в стиках також мають аналогічні недоліки, але, як правило, вони не встановлюються в житлових районах, так що їх негативний вплив відчувався менше. Тут необхідно враховувати, що під індустріальними радіоперешкодами мається на увазі електромагнітна перешкода, яка формується технічними засобами. Причому до індустріальних перешкод не належать перешкоди, створювані випромінюваними вихідних трактів радіопередавачів.

Індустріальні перешкоди можуть бути у вигляді наведених або випромінюваних електромагнітних завад. Тому випробування на рівні електромагнітних завад зазвичай містять два види тестів: кондуктивні електромагнітні перешкоди, які наводяться і присутні на лініях підключення харчування і телекомунікаційних портах пристрої, і перешкоди, які випромінює самим пристроєм. Гранична частотна точка між цими двома видами електромагнітних завад в стандартах на обладнання комерційного призначення встановлена рівної 30 МГц. Ця частота обрана виходячи з того, що, на типових

відстанях для вимірювання рівнів електромагнітного випромінювання (в даний час 3 і 10 м) частоти вище 30 МГц забезпечують випромінювання у вигляді плоскої хвилі. Це так зване умова далекого поля, або поле далекої зони (англ. far field), — область, в якій щільність потоку потужності випромінювання приблизно обернено пропорційна квадрату відстані від антени. Це дозволяє проводити досить точно повторювані вимірювання, які не мають критичної залежності від обладнання конкретної лабораторії, в якій вони проводяться, і умов випробувань.

Таким чином, ми досягаємо високої повторюваності результатів, а не маємо набір якихось випадкових вимірювань. Нижче частоти 30 МГц це може бути важко досяжним, і вимірюються тільки кондуктивні перешкоди.

Рівні кондуктивних перешкод на лініях живлення встановлюються на основі спільної перевірки джерела таких перешкод і їх приймача, підключених до однієї і тієї ж лінії електроживлення. Максимально допустимі рівні кондуктивних перешкод на телекомунікаційних портах встановлюються з урахуванням перетворення диференціальних сигналів кабелем (який використовується для передачі сигнал), частково перетворюються в синфазний сигнал, який потім випромінюється. Це пов'язано з не ідеальністю характеристик лінії передачі, в більшій мірі — кабелю, рідше через неузгодженості імпедансу точок його підключення [6].

У стандартах під поняттям «телекомунікаційний порт» мають на увазі порт зв'язку - місце з'єднання, в якому здійснюється передача мови, даних і сигналів, що забезпечують взаємозв'язок широко розгалужених систем за допомогою підключення обладнання до розрахованих на багато телекомунікаційних мереж — наприклад, комутованих телефонних мереж загального призначення (PSTN), цифрових мереж з інтеграцією служб (ISDN), цифрових абонентських ліній типу x (xDSL), локальних обчислювальних мереж (Ethernet, Token Ring тощо) і аналогічних мереж зв'язку.

Однак, якщо такий порт призначений виключно для зв'язку між компонентами системи (наприклад, інтерфейс RS-232, універсальна послідовна

шина USB тощо) і він використовується відповідно до своїх функціональних характеристик і з урахуванням максимально допустимої довжини кабелю зв'язку, то, відповідно до вимог чинних в даний час стандартів по ЕМС, кондуктивні перешкоди на таких лініях зв'язку не розглядаються.

2.2.1 Кондуктивно-електромагнітні перешкоди.

Рівні кондуктивних перешкод, наведених на лініях підключення електроживлення, зазвичай вимірюються за допомогою еквівалента мережі. В якості такого еквівалента використовується схема стабілізації повного імпедансу лінії, відома як LISN (англ. Line Impedance Stabilization Network), або еквівалента мережі AMN (англ. Artificial Mains Network). Це дві назви одного й того ж пристрою, однак в україномовній технічній літературі і стандартах ДСТУ частіше вживається термін «еквівалент повного опору мережі» (ЕПОМ) і рідше LISN; один з найбільш часто вживаних варіантів ЕПОМ наведено на рисунку 2.1.

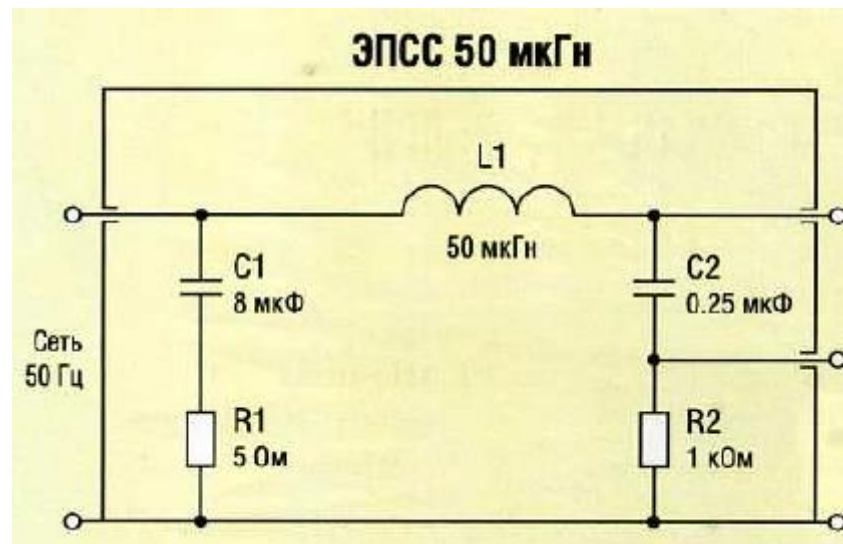


Рисунок 2.1 — Еквівалент повного опору мережі

На рисунку 2.2 показана узагальнена блок-схема випробувальної установки. Для того щоб забезпечити певний імпеданс лінії електропередачі і точку з'єднання з приймачем, еквівалент мережі ЕПОМ розміщують між

тестовим обладнанням і входом лінії електроживлення (мережі). Еквівалент підключається безпосередньо до входу подачі живлення. Залежно від передбачуваної установки випробувального обладнання (стіл або заземлена поверхня) виріб при випробуваннях розміщується або на горизонтальній заземлено площині на підлозі на ізолюючій підставці, наприклад, піддоні висотою $0.1 \text{ м} \pm 25\%$, або на непровідному столі висотою 80 см (рис. 2.2) . На практиці випробувальний приймач знаходиться поза межами камери.

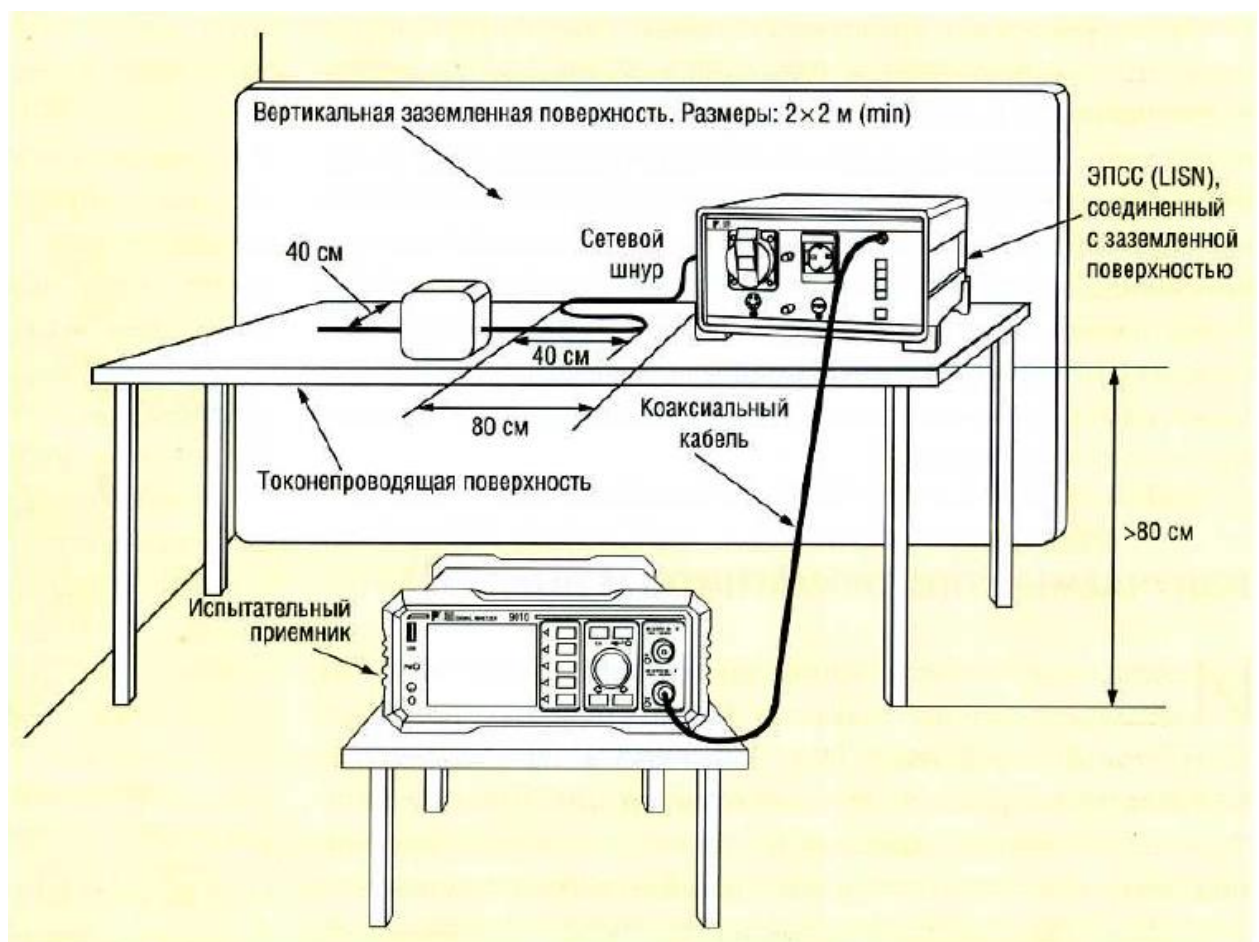


Рисунок 2.2 — Блок схема випробувальної установи

Необхідно враховувати, що в стандарт типу ДСТУ під терміном «випробувальне обладнання» (IC) мають на увазі окремо вживане обладнання, а під терміном «ВІТ» розуміється функціонально взаємодіє група зразків ОІ

(система), які містять один або кілька основних блоків, і саме така група є об'єктом випробувань.

Рівень перешкод в діапазоні частот перевіряється відповідними детекторами із заданою пропускну здатністю (зазвичай селективним вольтметром), а результати вимірювань фіксуються випробувачем. Вимірювання проводяться на кожному провіднику лінії електроживлення окремо. Більшість стандартів на відповідність вимогам ЕМС комерційного обладнання передбачають вимірювання, виконані в діапазоні частот 150 кГц — 30 МГц, однак іноді цей діапазон розширюється до 9 кГц — 30 МГц (частіше для виробів спеціального призначення). При вимірах в якості випробувального приймача використовується селективний мікровольтметр, для якого регламентована величина відносини синусоїдальної напруги до спектральної щільності напруги імпульсів на вході, яка викликає однакові показання вимірювального приладу, що містить інерційні детектори. У спеціальних лабораторіях зазвичай використовують прилади з автоматичною фіксацією показань у вигляді графіка і висновком супутніх йому таблиць.

2.2.2 Випромінюванні електромагнітні перешкоди.

Випромінювані електромагнітні перешкоди можуть бути виміряні або на відкритих вимірювальних майданчиках OATS (англ. Open Area Test Site), або в екранованих безлунних радіочастотних камерах SAC (англ. RF Semi — Anechoic Chamber). Тут необхідно уточнити наступне: під поняттям «вимірювальна майданчик» мається на увазі площадка, придатна для вимірювання перешкод, випромінюваних випробуваним пристроєм, параметрів і характеристик ЕМС технічного засобу і відповідає регламентованим вимогам. Під поняттям «екранована камера» розуміють приміщення, що має властивості екранування для поділу внутрішньої електромагнітної обстановки від зовнішньої. А поняття «підлозі безлунна камера» передбачає екрановане приміщення, всі внутрішні поверхні якого покриті безлунним матеріалом (рис. 1.3).

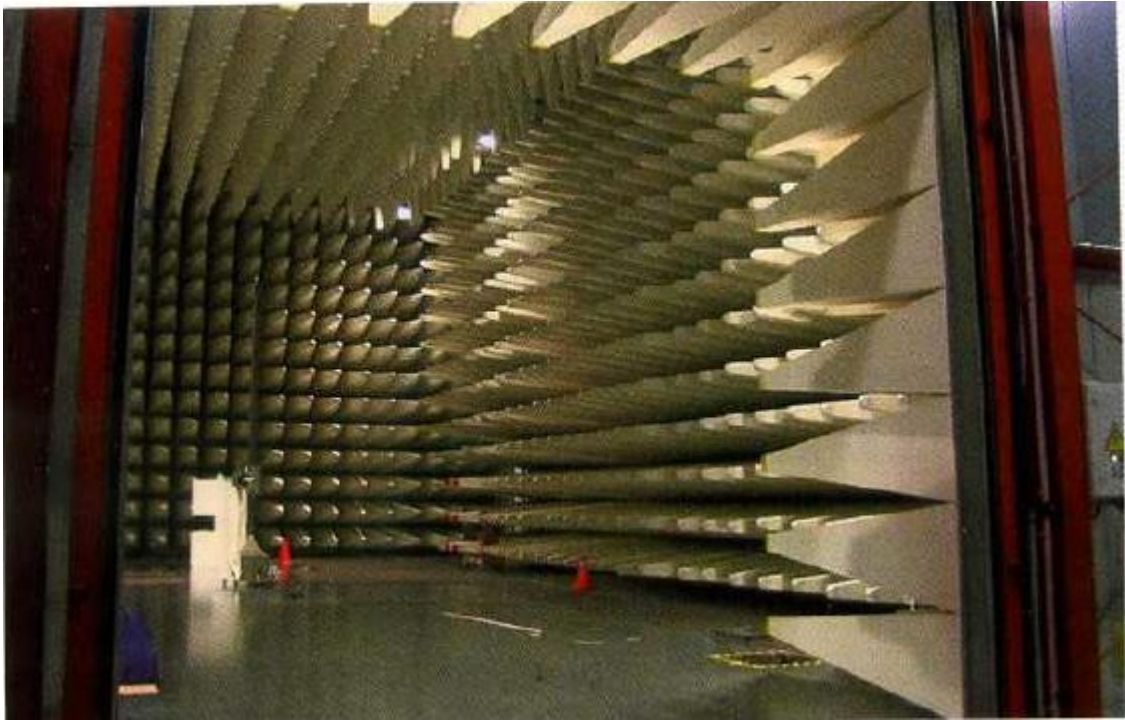


Рисунок 1.3 — Безлунна камера

Ідеальним рішенням є метод вимірювання в умовах відкритого простору OATS, який можна назвати кращим варіантом, однак і тут не все так просто. Така випробувальна лабораторія є великим відкритим майданчиком, вільна від об'єктів, здатних відображати радіочастотну енергію. Розмір радіопрозорі області визначається в різних стандартах як еліптична область, велика вісь якої в два рази перевищує відстань вимірювання, а мала вісь — квадратний корінь від триразової відстані до точки вимірювання [7].

Випробування та звіти демонструють, що такі розміри недостатні для вимірювань. Тому було випробувано їх дворазове збільшення, але навіть воно, як було з'ясовано згодом, має свої недоліки. Особливо яскраво вони виражені, коли для забезпечення безпеки майданчик OATS оточено захисною струмопровідною огорожею (рис 2.4).

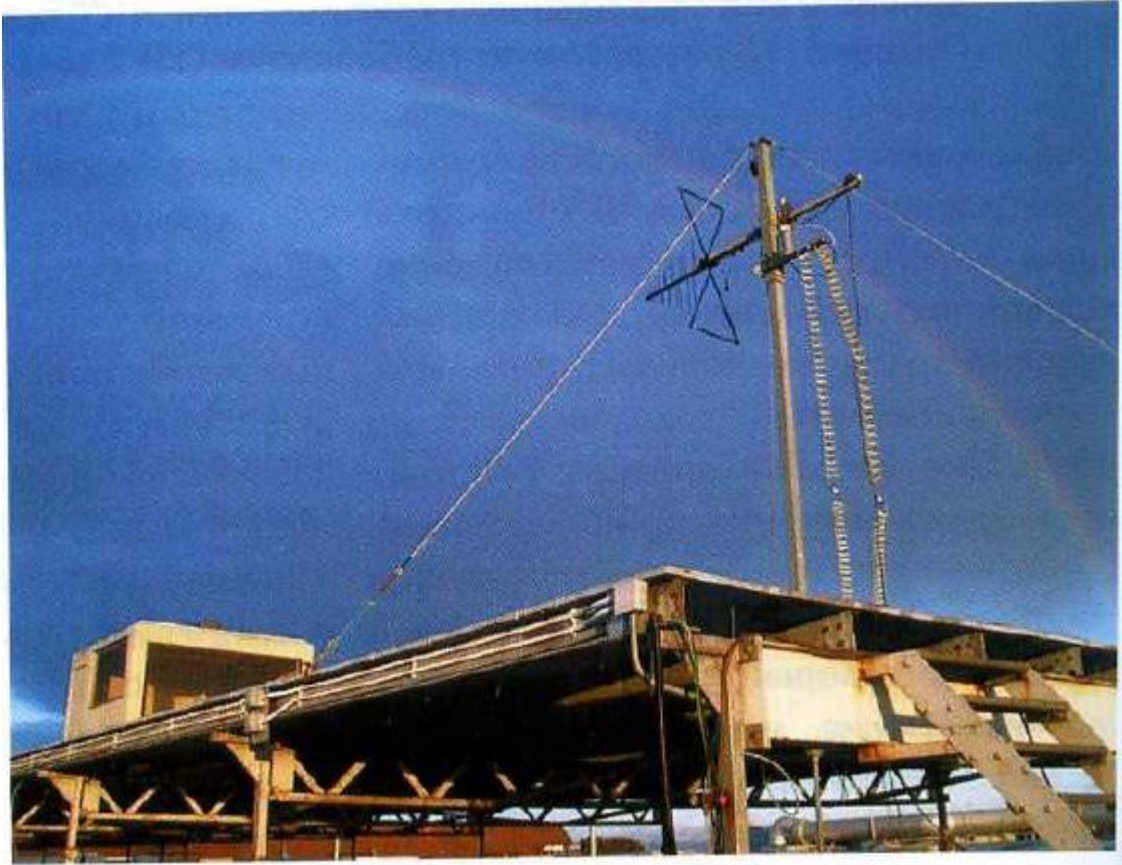


Рисунок 2.4 — Типова лабораторія ОАТS

Вимірювальна зона цього майданчика, як можна бачити, займає її більшу частину. Вона піднята над поверхнею землі, а поворотний стіл, на якому розташовуються тестовий пристрій, захищений радіопрозорою надбудовою. Для виключення впливу на результати вимірювання всі комунікації, в тому числі повітроводи для кондиціонування повітря, виконані під землею, а самі допоміжні установки розташовані за межами з міральної зони.

Істотним недоліком технології вимірювання з використанням ОАТS є те, що додатково фіксується випромінювання від тестових пристроїв. Для забезпечення заданої точності майданчики ОАТS повинні розташовуватися в дуже віддалених місцях. І навіть це, в нинішній ситуації з електромагнітним забрудненням середовища, не гарантує, що рівень власного електромагнітного випромінювання навколишнього середовища залишиться низьким. Ось чому багатьом компаніям доводиться використовувати виключно екрановані камери з 10-метровою вимірювальною відстанню (рис. 2.3).

Втім, випробування на вимоги по ЕМС на відкритих майданчиках ще не втратили своєї актуальності і проводяться до сих пір.

Незалежно від того, чи проводяться вимірювання на відкритих майданчиках OATS або в екранованих камерах SAC, блок-схема випробувальної установки залишається однією і тією ж. Електромагнітні перешкоди від випробуваного обладнання вимірюються за допомогою спрямованої антени для конкретного частотного діапазону, попереднього підсилювача (при необхідності) і вимірювального приймача (зазвичай селективного вольтметра). Вимірювання проводяться в вертикальній і горизонтальній поляризації відповідно до установленної антени (рис. 2.5).

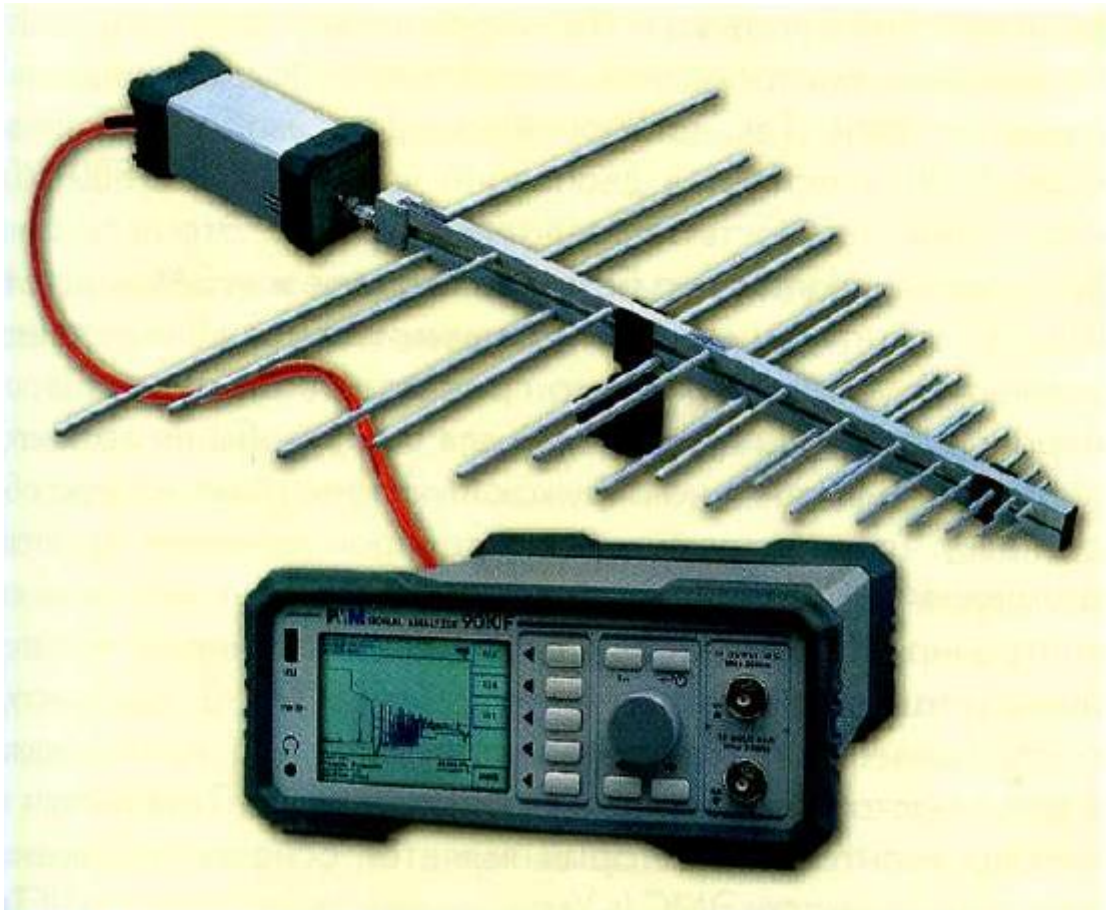


Рисунок 2.5 — Сучасний комплект обладнання для вимірювання

При проведенні вимірювань для оцінки рівня випромінюваних радіоперешкод може виникнути необхідність в скануванні по висоті, як це показано на схемі, наведеній на рисунку 2.6. Мета сканування наступна:

відрегулювати висоту антени так, щоб прямі і відбиті сигнали були максимальними. Приклад щогли з рухомою антеною показаний на фотографії майданчику OATS компанії Agilent Technologies (рис. 2.4) [8].

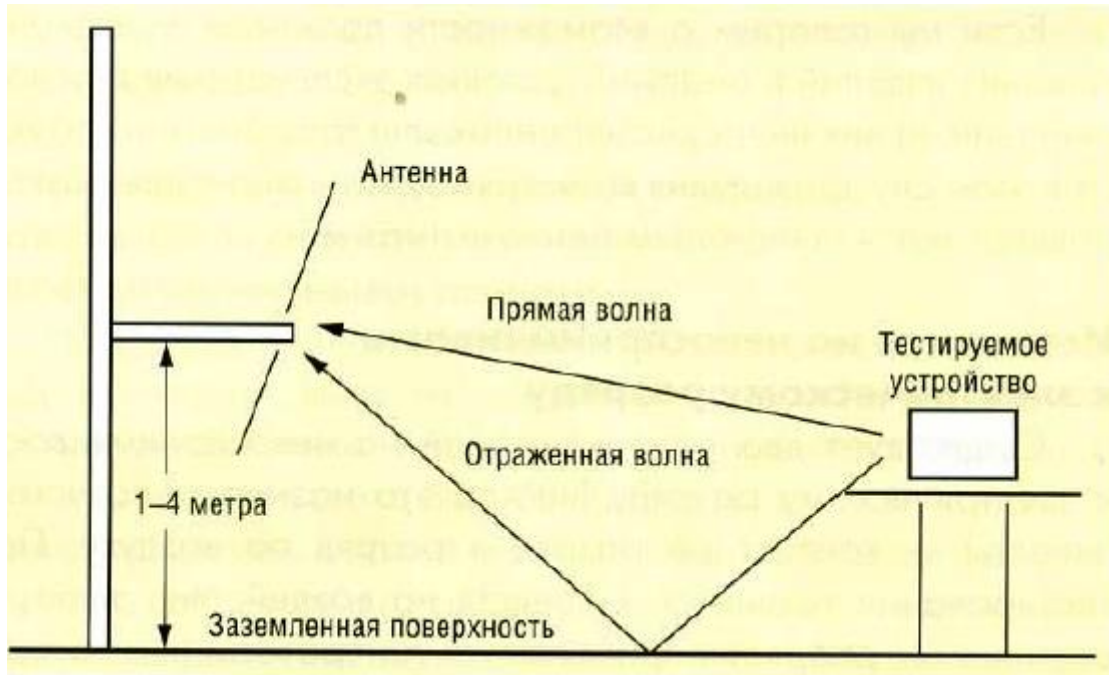


Рисунок 2.6 — Діаграма прямої та відбитої хвилі

Випробування на відповідність виробів вимогам за рівнями індустриальних радіоперешкод потрібні в багатьох країнах. Крім того, в ряді країн проводяться і випробування комерційних продуктів на стійкість до впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання. Такі види випробувань проводяться в основному в розвинених країнах, і виробники комерційного обладнання повинні знати про подібні нюанси і враховувати їх при проектуванні і виготовленні продукції, призначеної для експорту.

Таблиця 2.1 — Різні аспекти електромагнітної сумісності

Електромагнітна сумісність (EMC)			
Електромагнітні випромінювання (EMI)		Електромагнітна чутливість (EMS)	
Наведені завади	Випромінюванні завади	Стійкість до наведених завад	Стійкість до випромінюваних завад
Струм завад	Електричне поле	Струм завад	Електричне поле
Напруга завад	Магнітне поле	Напруга завад	Магнітне поле
	Електро-магнітне поле		Електро-магнітне поле

2.2 Засоби виміру

Розглянемо, як сигнали проходять через провідники друкованих плат і як на їх передачу впливають створювані ними електромагнітні поля.

Існує багато чинників, пов'язаних з конструкцією друкованих плат, які впливають на рівень випромінювання електромагнітних завад (EM3) і порушують вимоги щодо електромагнітної сумісності (EMC).

Серед них:

- вплив на чутливі аналогові схеми перешкод від цифрових сигналів, шумів і перешкод, що генеруються такими пристроями, як перетворювачі потужності (імпульсні джерела живлення) і двигуни;

- розташування генераторів тактової частоти занадто близько до країв плати або поблизу чутливих ланцюгів;
- погане трасування, яке приводить до перехресних перешкод;
- для сигналів тактової частоти або високошвидкісних сигналів не виконані зазори або прорізи в площині повернення струму;
- неправильний набір стека друкованої плати — пакета з шарів діелектрика, струмопровідних шарів різного призначення;

Останнє — найголовніше, і це саме те, що повинно враховуватися розробниками плат насамперед. Це небезпека перетину трас тактової частоти через проміжки в опорній площині повернення струму.

Однак усунення цієї проблеми правильним виконанням стека шарів друкованої плати зазвичай виправляє і більшість інших проблем, включаючи викладені в цьому короткому переліку.

Перш ніж зрозуміти, як сигнали поширюються в платах, наприклад, персонального комп'ютера, слід спочатку усвідомити деякі фізичні особливості цього процесу. Всі знають, що «струмом» є потік електронів в провіднику. Це близько до істини, за винятком того, що ми забуваючи їм про позитивний перебігу струму, тобто про відсутність дірок. Однак електрони і дірки (позитивні заряди), які вони залишають, рухаються дуже повільно. Цей шлях струму, звичайно, справедливий для ланцюгів постійного струму (за винятком початкового перехідного процесу при включенні батареї). Але для ланцюгів змінного або радіочастотного струму, або для виходу постійного струму (з перехідними процесами) від імпульсних джерел живлення треба розуміти, що все з'єднувальні дроти і траси на друкованих платах повинні розглядатися як лінії передачі.

Для початку розглянемо, як потік електронів пропускають конденсатори. Якщо ми підключимо батарею до конденсатору (рис 2.7) то все позитивно заряджені заряди, прикладені до верхній пластині(конденсатора, будуть

відштовхувати позитивні заряди на нижній пластині, залишаючи на ній тільки негативні заряди. Якщо ми будемо використовувати джерело напруги змінного струму, то струм пройде через конденсатор. Можна припустити, що струм тече через діелектрик, що неможливо. Але якщо взяти прилад, що вимірює магнітне поле, то в проміжку між обкладинками ми це поле виявимо. Джеймс Клерк Максвелл зробив важливий висновок, що будь-яке змінне електричне поле породжує змінне магнітне поле. Цей струм він назвав «струм зміщення» (displacement current), або «абсорбційний струм». Він виникає, коли позитивні заряди на одній пластині просто зміщують позитивні заряди на протилежну пластину, залишає негативні заряди, і навпаки. Струм зміщення визначається як dE / dt (тобто зміна електричного поля E в часі) [9].

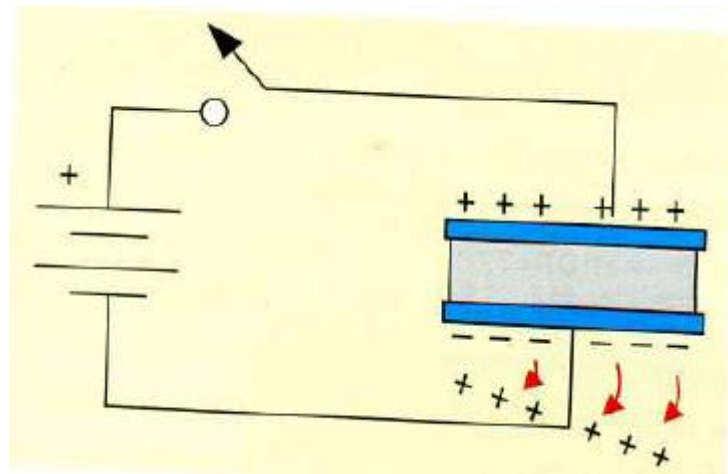


Рисунок 2.1 — Схема джерело/конденсатор

Коли перемикач замкнутий, то при підключенні акумулятора на верхню пластину вводяться позитивні заряди, які відштовхують позитивні заряди на нижній пластині, залишаючи на ній тільки негативні заряди. Це «з'являється», як якщо б у момент включення через діелектричний шар струм дійсно проходив. Для змінної напруги це буде виглядати як зміна зарядів на пластинах. Важливим моментом тут є те, що енергія в конденсаторі накопичується у вигляді напруги.

Слід також розуміти, що електрони і позитивно заряджені дірки рухаються не зі швидкістю світла, і не з близькою до швидкості світла. У міді через дуже сильний атомний-зв'язок вони рухаються зі швидкістю всього близько 1 см/с. Звичайно, тут є хмари вільних електронів і дірок, але вони досить повільно переміщуються від атома до атома. Такий струм називається струмом провідності, і саме він вимірюється за допомогою амперметра.

Вплив одного електрона в атомі міді на інший який знаходиться по близькості поширюється знову ж таки не зі швидкістю світла, а зі швидкістю поширення електромагнітного поля в діелектричному матеріалі, яка залежить від діелектричної проникності. Іншими словами, умовно похитуйте один електрон на одному кінці мікро-стрічкова лінії, і він похитує наступний, який в свою чергу похитує наступний, і так далі, поки не дійде до останнього в кінці. Це коливання називається переломом в електричному E -поле, і його, як механічну аналогію, можна уявити на прикладі «колиски Ньютона» (сучасна назва маятника Ньютона). У «колисці Ньютона» перша кулька передає імпульс другій кульці і зупиняється (рис. 2.8)

Друга кулька отримує імпульс потенційної енергії від першої, але через неможливість перетворення потенційної енергії в кінетичну імпульс переходить від другого маятника далі - в третій і так далі до останнього. Остання кулька не має перед собою об'єкта, котрому можна було б передати свій імпульс, по цьому вільно рухається, піднімаючись на висоту, трохи меншу за ту, з котрою рухався перша кулька-(це можна вважати аналогом опору)[10].

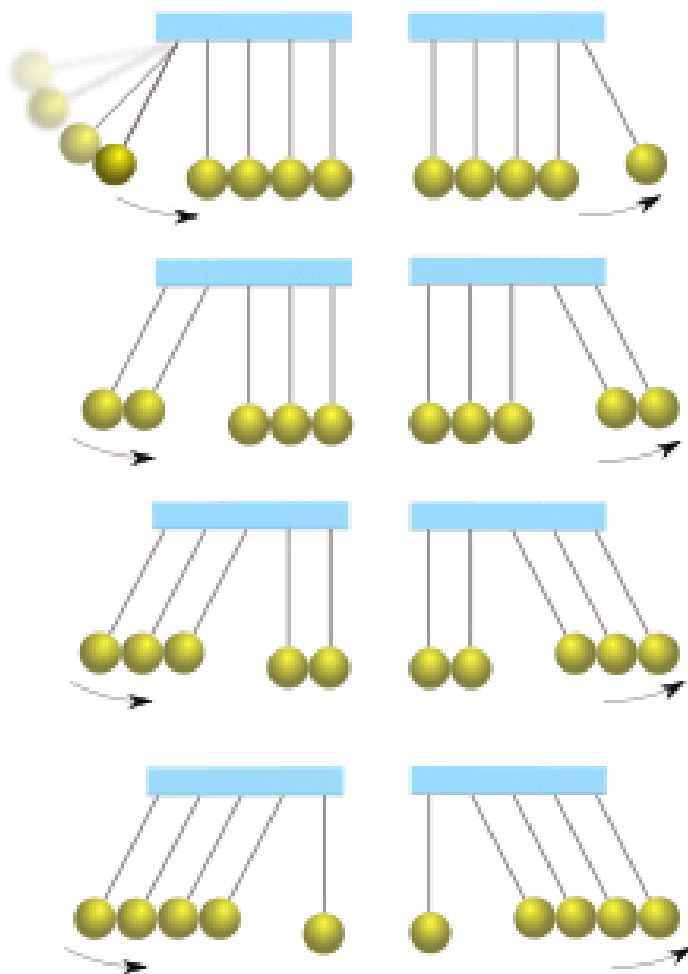


Рисунок 2.8 — Схема «Ньютонова коліскова»

Наступна проблема, яку потрібно зрозуміти і запам'ятати, полягає в тому, що електромагнітне поле цифрового сигналу поширюється в діелектричному просторі, а не в міді. Мідь просто «направляє» електромагнітну хвилю. Коли сигнал, а вірніше електромагнітна хвиля, спочатку подається (вводиться) між мікро-стрічковою лінією і опорною площиною заземлення GRP, він починає поширюватися уздовж лінії передачі, утвореної провідником, розташованої над GRP. Тут має місце комбінація струму провідності (по міді) і струму зміщення (поперек діелектрика). Захоплення «електромагнітного випромінювання» відбувається на фронті електромагнітної хвилі в міру її поширення. У цей момент електричне поле за початковим фронтом хвилі стабільно при будь-якому доданому в даний момент напрузі, а саме електричне поле перед початковим

фронтом хвилі дорівнює нулю. Швидкий час наростання або спаду цифрового сигналу, як відомо з азів радіотехніки, продукує енергію в сумі всіх його гармонійних складових, і це саме те, що створює нам ЕМЗ.

Якщо імпеданс навантаження дорівнює характеристичному імпедансу лінії передачі, тоді відбиття електромагнітної хвилі назад до джерела не буде. Однак якщо є невідповідність, то електромагнітні поля будуть відбиватися і поширюватися назад до джерела. Тут виникають втрати, звані втратами на відбиття, що впливають на цілісність сигналу. Насправді, в реальній практиці більшість цифрових сигналів матимуть безліч відбиттів, що рухаються вперед і назад по лінії передачі одночасно, але їх необхідно мінімізувати. Якщо не вжити належних заходів, то перехідна зона, час наростання або спаду, хвиль, які поширюються, може викликати електромагнітні перешкоди.

Для того щоб побудувати лінію передачі, потрібні два накладених один на одного металевих шари, розділених діелектриком, які захоплюють або утримують електромагнітне поле. Або розміщення декількох сигнальних шарів між джерельними і площами заземлення для швидких сигналів приведе до цілком реальних проблем випромінювання ЕМЗ. Дотримання двох згаданих вище правил визначатиме кількість і порядок розподілу стека шарів друкованої плати. Іншими словами, кожна траса сигналу або роздачі напруги повинні мати сусідню опорну заземлювальну площину GRP, а все площині напруги повинні мати ще й суміжну GRP. Кілька GRP повинні бути пов'язані один з одним максимальним числом перехідних отворів [11].

2.3 Найбільш вірогідні джерела завад

Більшість виробів не проходить перевірку на рівні випромінювання через випромінюючих кабелів або проблем з їх корпусами. Ось деякі моменти, які можна швидко перевірити.

2.3.1 Випромінювання кабелів.

I/O-кабелі (портів входу/виходу) або силові кабелі, як правило, випромінюють високочастотні гармоніки через погане з'єднання їх екрану з шасі або корпусом, відсутність адекватної фільтрації або, коли вони просто «проштовхуються» через отвір в екранований корпус. Як правило, якщо присутні відмови на частотах нижче 200 МГц, це вказує на випромінювання кабелю. Причина, по якій випромінювання низької частоти виходить від кабелів, полягає в тому, що для створення гарної антени необхідна якась фізична довжина. І чим вона більша, тим ефективніше така «антена» може передавати випромінювання. Зазвичай кабелі є самої «довгою» частиною обладнання і, отже, джерелом більшості низькочастотних завад з отриманням і приводом для виникнення проблем в цьому частотному діапазоні.

Так перешкода вийшла назовні по кабелю до інтерфейсу (рис. 2.8). Як можна бачити з представленого малюнка, знайти це не так просто.

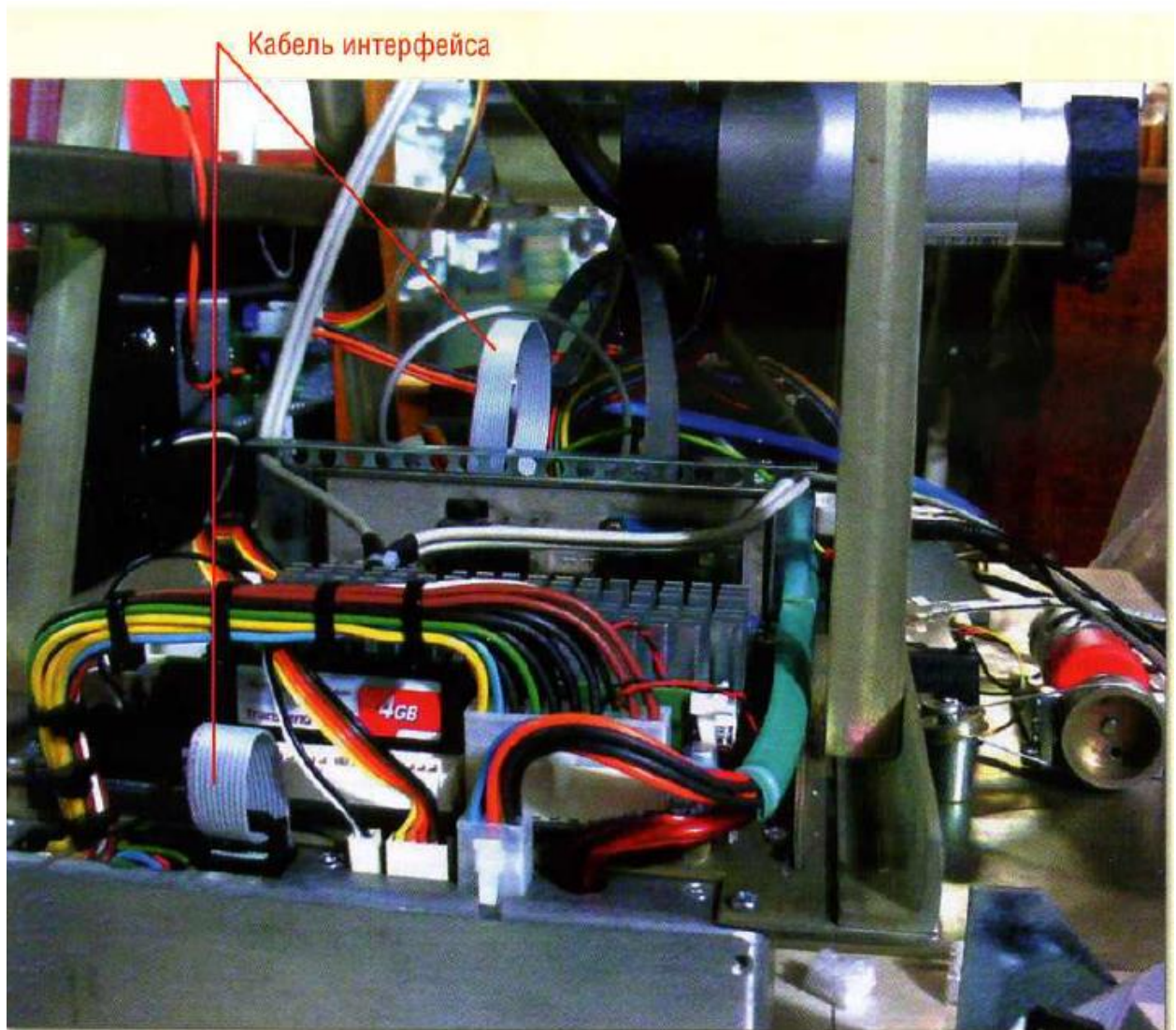


Рисунок 2.8 — Зовнішня перешкода

2.3.2 Металева шасі і корпус.

Випромінювання на більш високих частотах (зазвичай понад 200 МГц) найчастіше виникає через випромінювання металевого шасі і корпусу обладнання.

На цих, більш високих частотах кабелі введення/виведення в зв'язку з їх індуктивною складовою зазвичай мають більш високий, ніж шасі, імпеданс, а, отже, і меншу тенденцію до випромінювання. Єдиний виняток — випадок, коли тестове обладнання відрізняється великими габаритами. Так, металева шафа

заввишки більше 2м, який спирається на площину заземлення, може мати четверть хвильовий резонанс на частотах близько 30-40 МГц.

2.3.3 Стики.

Один з поширених джерел проблем — стики корпусу.

Друковані плати всередині пристрою можуть створювати струми на внутрішній поверхні шасі. Ці високочастотні струми впливають з стиків або зазорів, а потім поширюються по зовнішній частині шасі або корпусу обладнання. Таким чином, весь корпус стає хорошою антеною. Винятком є те, що більша частина струму може бути повернута до джерела, дуже близького до точки, де вона з'єднана з шасі.

Ось чому переважно використовувати байпасну ємність на монтажній платі або на площині зворотного зв'язку плати, які добре пов'язані з корпусом.

Ще один метод полягав в наступному. У виробі був цілий джгут провідників, які потрібно підключити до корпусу. Якщо їх підключали частинами - виникало багато перешкод. Вихід був знайдений, коли всі дроти з'єднали разом і вже експериментальним шляхом було знайдено на шасі оптимальну точку заземлення.

Коли високочастотні струми течуть всередині корпусу обладнання і приходять до місця стику або шву, вони повинні мати можливість безперешкодно перетекти через цей шов. Імпеданс навіть в кілька міліОм призведе до падіння напруги на такому стику, а в результаті створить сильне електричне поле, яке буде випромінюватися в простір. Зверніть увагу, що горизонтальний шов має градієнт напруги або вектор зверху вниз, створюючи вертикально поляризоване електричне поле, а вертикальний шов генерує домінуюче горизонтально поляризоване поле [12].

Гарна методика усунення неполадок — відзначити поляризацію поля перешкоди (що допустимо тільки при використанні антени для електричного поля) і визначити, чи може вона бути викликана неякісним швом.

Якщо у виробі передбачений рідкокристалічний (РК) дисплей, витік іноді виникає по краях такого дисплея. У багатьох випадках РК-дисплеї погано пов'язані з корпусом і можуть виступати в якості передавальної антени.

Інші області витоку — щілини між з'єднувальними дочірніми картами (як в типовому корпусі ПК) або вентиляційними отворами.

У тому випадку, якщо в пристрої є двигуни, то не треба забувати і про них.

Вони теж джерела ЕМП, особливо це стосується колекторних двигунів, тут обов'язково потрібні елементи які подавляють завади, встановлені не безпосередньо на вводах-виводах самих двигунів [13].

2.4 Методи та засоби усунення або зменшення впливу завад

Отже, встановивши, що цифрові сигнали і ланцюги роздачі живлення (тут маємо на увазі перехідні процеси) є джерелом електромагнітних хвиль в діелектричному шарі, визначає важливі принципи і основні підходи до проектування «правильної» друкованої плати. Шестишарові друкована плата найбільш часто використовує шестишарові стики шарів друкованої плати (табл. 2.1). Це досить добре працювало в 1990-х і навіть на початку 2000-х, але з сучасними, набагато більш швидкими і змішаними технологіями сигналів цей варіант з точки зору ЕМП просто катастрофа. З ним пов'язані дві проблеми. Перша — два нижніх сигнальних шари прив'язані до площини живлення, а друга — зворотна площина струму живлення і «землі» не суміжні і розташовані дуже далеко один від одного[14].

Таблиця 2.2 — Шестишарова друкована плата

Назва шару	Тип шару	Матеріал шару	Товщина шару, мм	Тип діелектрика	ϵ
Позиційна назва компонентів	Покриття				
Верхня паяльна маска	Покриття/Захисна маска	матеріал покриття	0.04	паяльна маска	3.5
Верхній шар	сигнальний	мідь	0.7		
діелектрик 1	діелектричний	препреги	5	FR4	4.2
шар 02	Внутрішній, земля	мідь	0.7		
діелектрик 10	діелектричний	підстава	10	FR4	4.2
шар 03	сигнальний	мідь	0.7		
діелектрик 5	діелектричний	препреги	10	FR4	4.2
шар 04	Внутрішній, живлення	мідь	0.7		
діелектрик 3	діелектричний	підстава	4	FR4	4.2
шар 05	сигнальний	мідь	0.7		

Продовження таблиці 2.2

Назва шару	Тип шару	Матеріал шару	Товщина шару, мм	Тип діелектрика	ϵ
діелектрик 2	діелектричний	препреги	10	FR4	4.2
шар 06	сигнальний	мідь	0.7		
діелектрик 8	діелектричний	підстава	10	FR4	4.2
шар 07	сигнальний	мідь	0.7		
Діелектрик9	діелектричний	препреги	5	FR4	4.2
нижній шар	сигнальний	мідь	1.417		
Нижня паяльна маска	Покриття/Захисна маска	матеріал покриття	0.04	паяльна маска	3.5

У стеці, показаному в таблиці 3, сигнальні шари «Сигнальний шар 2» і «Нижній шар» розташовані щодо шару живлення, в той час як опорна заземлювальна площа GRP («Земля») і площині живлення (Живлення) з двома сигнальними шарами між ними не є суміжними. Це призведе до взаємного впливу перехідних процесів в цих двох сигнальних шарах. За небагатьма винятками струми «хочуть» повернутися до своїх джерел, які прив'язані до опорної заземленої площині GRP.

Прив'язка цих сигналів на площину живлення дуже небезпечна з точки зору електромагнітних завад, тому що тут немає чітко визначеного шляху повернення струму, крім як через міжшарову ємність, яка в цьому випадку відносно мала. До того ж зазори на шляху зворотного потоку призводять до

витоку поля в інші області діелектричних шарів плати. Це, в свою чергу, призводить до перехресного зв'язку і випромінювання ЕМЗ.

Ще одна проблема виникає в тому випадку, коли у нас є шар живлення і опорна заземлювальна площа GRP, розділені двома сигнальними шарами. Будь-які перехідні процеси в ланцюгах живлення тепер будуть перехресно з'єднуватися в діелектричних шарах, з'єднуючись з будь-якими трасами в сигнальних шарах по шляху їх поширення. Ми також, якщо ці площини розділені більш ніж на 3-4 мм, втрачаємо переваги через наявність ємності між площинами.

Нижче наведено кілька ідей для компоновання шарів друкованої плати ПК, які відповідають природі поширення цифрових сигналів в лінії передачі.

Чотиришарова друкована плата[15].

2.4.1 Рішення 1.

Хороший чотирьох-шаровий стек друкованої плати для оптимізації рівня ЕМП наведений на рисунку 2.9. Тут замість площині живлення ми використовуємо або спрямоване, або розподілене рішення, а також сигнали на рівнях 2 і 3. Таким чином, кожна сигнальна траса і лінія живлення виявляються суміжними з опорної заземленої площиною GRP. Крім того, тут легко виконати перехідні отвори між усіма верствами за умови, що два шари заземленої площині GRP пов'язані один з одним безліччю перехідних отворів між опорними заземленої шарами. Однак якщо провести ряд заземлюючих перехідних отворів, що зшивають опорні «земляні» площині по периметру, припустимо, через кожні 5 мм, то можна сформувати клітку Фарадея, яка замкне в собі електричне поле.

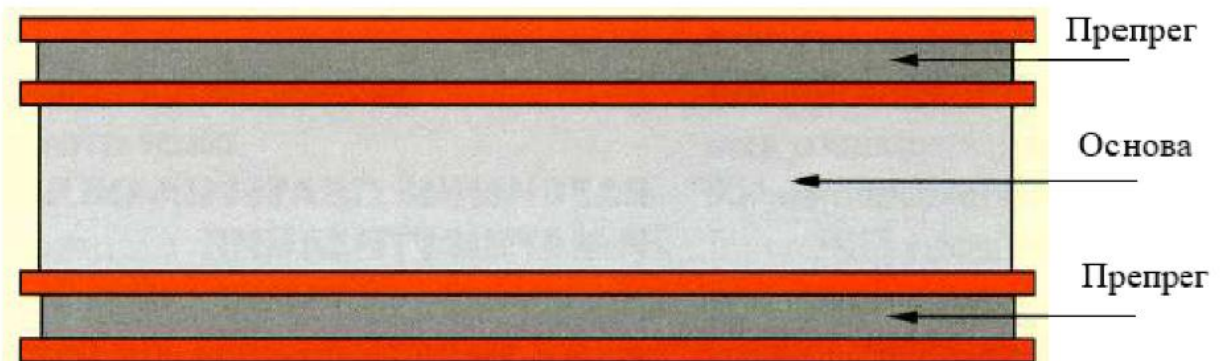


Рисунок 2.9 — Чотирьох-шаровий стек друкованої плати

2.4.2 Рішення 2.

Якщо є розуміння що за краще мати доступ до сигналу і ліній живлення, то можете просто можна поміняти місцями пари шарів так, щоб дві опорні заземлюючі площині GRP знаходилися посередині, а два сигнальних шару були розташовані зверху і знизу плати, з лініями роздачі живлення, які мають достатню кількість блокувальних конденсаторів, а не окремої площиною живлення.

Для обох чотиришарових плат можна виконати шари заземлення, в цьому випадку два шари GRP необхідно зшити глухими заземлювальними перехідними отворами на відстані не більше 1 см між ними[16].

3 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЗАВАДИ В АПАРАТУРІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

3.1 Аналіз електромагнітних завад

Що потрібно знати про випробування на виконання вимог ЕМС для виробів спеціального призначення.

Випробування на ЕМС такого обладнання охоплюють досить широкий спектр найрізноманітніших продуктів даного напрямку техніки. І хоча стандарти, включаючи обмеження і методи тестування, можуть відрізнятися, всі вони в частині перевірки на відповідність вимогам ЕМС мають загальні риси. Обладнання, що використовується і схеми вимірювань багато в чому схожі на обладнання та схеми загального призначення.

Що стосується обладнання військового та аерокосмічного призначення, тут основні вимоги в частині ЕМС, так само, як і для продуктів комерційного призначення, — це відповідність заданим обмеженням на рівні наведених і випромінюваних завад, а також на рівні чутливості до впливів електромагнітних полів з урахуванням області застосування і специфіки конкретного обладнання. Для обладнання військового та аерокосмічного призначення випробування на рівні перешкод і пов'язані з ними обмеження призначені в першу чергу для забезпечення надійного функціонування всіх інших систем кінцевого виробу в умовах, наведених і випромінюваних перешкод по ланцюгах підключення, а також взаємної емісії та впливу зовнішніх електричних, електромагнітних і магнітних полів. Ці норми жорсткіше і більш детально опрацьовані. Причому і обладнання, і системи не обов'язково містять ті чи інші радіоприймальні пристрої. Важливість вирішення цієї проблеми наочно ілюструють приклади, що демонструють наслідки неадекватної з точки зору ЕМС конструкції[18].

Хоча в багатьох типах військового і аерокосмічного устаткування проблеми ЕМС можуть бути усунені внесенням оперативних змін, але для виявлення слабких місць потрібне проведення випробувань не тільки на рівні НДДКР, а й сертифікації виробів. Виявлення відхилень на початкових етапах розробки значно скорочує витрати на подальшу ув'язку всієї системи в цілому. Тому без випробувань неможливо обійтися, однак вони, як відомо, не є якоюсь самоціллю, а повинні проводитися за стандартизованою-методикою і спиратися на відповідність встановленим граничним нормативам.

Тестування з виконання регламентів ЕМС для обладнання військового та аерокосмічного призначення виконується на рівні системи і підсистеми. Вимоги на рівні обладнання або підсистеми забезпечує остання версія стандарт та MIL-STD-461G, а вимоги на рівні системи або платформи розміщення обладнання (носія) встановлює стандарт MIL-STD-464C.

Чому для огляду були обрані саме стандарти США-MIL-STD-461 G і MIL-STD-464C? Справа в тому, що на практиці вони давно стали між народними і відповідність їх вимогам часто вказується в документації не тільки на обладнання або вироби оборонного та аерокосмічного напрямління, але і там, де потрібно підтвердити високу надійність і стійкість до зовнішніх впливів, в тому числі і щодо ЕМС. Найчастіше вони використовуються в області розробки систем управління, обчислювальних систем, компонентів авіаційної і автомобільної техніки та виробів подвійного призначення. Крім того, з ними стикаються і при закупівлі імпортованих комплектуючих виробів та обладнання, в тому числі не тільки оборонного призначення[15].

Система випробувань, покладена в основу стандарту MIL-STD-461G в частині відповідності з ЕМС, включає перевірку на рівні випромінюваних електромагнітних завад (емісію) і сприйнятливості до них, а також на рівні кондуктивних (наведених) перешкод і на сприйнятливості до таких перешкод.

Стандарт MIL-STD-461G розділяє ці вимоги на чотири основні категорії. Категорія PE — кондуктивні завади; CS — сприйнятливості до кондуктивним перешкод; RE — випромінюються електромагнітні перешкоди (емісія) і RS —

сприйнятливість до електромагнітної емісії. Незаперечною перевагою стандарту, як і більшості стандартів MILSTD, є чіткість і однозначність не тільки всіх норм і методик, а й тлумачення результатів. Разом з тим даний стандарт не обмежує розробника жорсткими рамками там, де не потрібно. Останнє спостерігалось в радянських стандартах, які залишилися стосовно військової тематики нерідко були галузевими, засекреченими, мали як мінімум гриф ДСК (для службового користування) і зберігалися не в відділі стандартизації, а в першому відділі:

- поняття «кондуктивні завади» (англ, continuous conducted emissions) має на увазі напруги/струми перешкод безперервного характеру, існуючі на проводах джерела живлення та інших проводах елемента/модуля, які можуть створювати поміхи роботі бортового приймача;

- поняття «кондуктивна сприйнятливість» (англ, conducted susceptibility) передбачає сприйнятливість системи до кондуктивним (наведеним) сигналам в кабелях, підключених до системи;

- поняття «електромагнітна емісія», або «електромагнітна перешкода» (англ. Radiated emissions), має на увазі електромагнітну перешкоду, що поширюється в просторі;

- поняття «електромагнітна сприйнятливість» (англ, radiated susceptibility) визначає здатність рецептора реагувати на електромагнітну перешкоду[19].

3.2 Усунення завад та захист військової та аерокосмічної апаратури

З урахуванням питань, які було розглянуто у попередніх розділах, можна запропонувати для забезпечення електромагнітної сумісності та зменшення впливу завад у апаратурі спеціального призначення такі рекомендації:

- роздільне при можливості дистанційне розташування засобів випромінювання та приймання сигналів;

- екранування як окремих високочутливих приймальних так випромінюючих елементів, блоків та засобів;

- заземлення екрануючих систем та елементів;
- заземлення провідникових конструкційних поверхонь, які розташовані біля критичної до впливу завад апаратури;
- використання поляризаційних методів розділення сигналів;
- конструктивне усунення внутриблокового впливу сигнальних та джерельних завад;
- використання безстикових та безззорних конструкцій;
- активне використання ємнісного заземлення для захисту від високочастотних завад;
- введення попередньої, як при введенні в експлуатацію, так і кожному робочому включенні перевірки на наявність електромагнітних завад (необхідне відповідне забезпечення вбудованими або окремими засобами визначення завад) [20].

ВИСНОВКИ

В ході виконання роботи було розглянуто низку питань пов'язаних з забезпеченням електромагнітної сумісності радіоелектронної апаратури інформаційних систем і мереж, а саме:

- види і характеристики електромагнітних завад;
- фізичні процеси виникнення та впливу електричних завад на електронні системи;
- методи та засоби визначення та вимірювання рівня завад;
- існуючі стандарти щодо визначення завад та вимог до їх вимірювання;
- наведено практичні приклади виникнення, поширення та впливу електромагнітних завад;
- запропоновано низку рекомендацій щодо зменшення впливу завад в апаратурі спеціального призначення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. 2017 EMC TESTING GUIDE, INTERFERENCE TECHNOLOGY GUIDE SERIES [Електронний ресурс]: — Режим доступу: www.learn/interferencetechnology.com/2017-emc-testingguide.
2. Електромагнітне випромінювання [Електронний ресурс]: — Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Електромагнітне_випромінювання
3. Рентюк В. — Електромагнітна сумісність: проблема, рішення якою не уникнути, CHIP NEWS Україна, 2018. № 1.
4. Бондаренко І. М., Мікроелектроніка НВЧ. Ч. 1. Елементи та пристрої НВЧ-тракту: Навчальний посібник / І.М. Бондаренко // Харків: ХНУРЕ. 2017. – 151с.
5. Рентюк В. — Що потрібно знати про випробування на виконання вимог по EMC для виробів комерційного призначення, CHIP NEWS Україна, 2018. № 1.
6. Вейт К. — Troubleshooting Radiated Emission at the EMC Lab. Technical Services LLC. 2017 ITEM Media. №3.
7. Электромагнитная совместимость при использовании преобразователей частоты [Електронний ресурс]: — Режим доступу: <http://electricalschool.info/elprivod/1624-jelektromagnitnaja-sovmestimost-pri.html>
8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ [Електронний ресурс]: — Режим доступу: <https://www.symmetron.ru/suppliers/infineon/files/pdf/infineon/INF13.pdf>
9. Бондаренко І. М., Мікроелектроніка НВЧ. Ч. 2. Напівпровідникові елементи та пристрої НВЧ: Навчальний посібник / І.М. Бондаренко // Харків: ХНУРЕ, 2018. – 171с.
10. EMI Troubleshooting – Step-By-Step [Електронний ресурс]: — Режим доступу: <https://interferencetechnology.com/emi-troubleshooting-step-step/>.

11. Рентюк В. — Практичні питання застосування ІМС ізольованого інтерфейсу в частині виконання вимоги щодо електромагнітної сумісності, Компоненти і технології, 2015. № 3.
12. Бондаренко І. М., Електронні системи: Навчальний посібник / І. М. Бондаренко, О. В. Глухов, О. О. Кравчук // Харків: ХНУРЕ. 2019. – 2019с.
13. Рентюк В. — Рішення проблеми магнітного екранування, але прикладі матеріалів компанії Würth Elektronik, CHIP NEWS Україна. 2015. № 8.
14. Петит Г. — Summary o f Military and Aerospace EMC Tests, EMC Consulting, 2017. №1
15. Смирнов А., Басалаев К. — Тест на сумісність, Експерт+. № 1. 2015
16. Явор К. MIL-STD-461G: The Compleat Review, Interference Technology. April 2016.
17. Явор К. Why Is There AIR (in MIL-STD-461G), Interference Technology, April 2016.
18. Benefield Anechoic Facility [Електронний ресурс]: — Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Benefield_Anechoic_Facility
19. Бондаренко І.М., Сучасна компонентна база електронних систем: Навчальний посібник / І. М. Бондаренко, О. В. Бородин, В. П. Карнаушенко // Харків: ХНУРЕ. 2020. – 268с.
20. Ранченко Г. С., Буряченко А. Г. — «Квалификация комплектующих изделий образцов авиационной техники — современные требования и взаимодействие национальных и межгосударственных авиационных властей», Авіокосмічна техніка та технології, 2016. №7.