

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Метод підвищення завадостійкості радіотехнічного обладнання у
кабельних мережах зв'язку

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи РРм-61
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

	_____	Трач Н.Р.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник	_____	Дунець В.Л.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	_____	Хвостівська Л.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	_____	Дунець В.Л.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент	_____	
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дунець В.Л.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2021 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

студенту Трачу Назарію Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Метод підвищення завадостійкості радіотехнічного обладнання у кабельних мережах зв'язку

Керівник роботи Дунець Василь Любомирович, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 30 » листопада 2021 року № 4/7-1019

2. Термін подання студентом завершеної роботи

3. Вихідні дані до роботи Об'єкт дослідження: процес моделювання електромагнітних сумісностей; Предмет дослідження: методи та засоби для оцінювання завадостійкості радіотехнічного обладнання у кабельних мережах зв'язку

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітична частина

2. Основна частина

3. Науково-дослідна частина

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В.М., стар. викл. каф. ОХ		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання		
2	Аналіз завдання		
3	Виконання розділу 1		
4	Виконання розділу 2		
5	Виконання розділу 3		
6	Виконання розділу 4		
7	Оформлення пояснювальної записки		
8	Оформлення графічного та презентаційного матеріалу		
9	Перевірка роботи на антиплагіат		
10	Попередній захист		
11	Захист		

Студент _____ (підпис) _____ *Грач Н.Р.*
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ (підпис) _____ *Дунець В.Л.*
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Метод підвищення завадостійкості радіотехнічного обладнання у кабельних мережах зв'язку» // Кваліфікаційна робота // Трач Назарій Романович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, група РРм-61 // Тернопіль, 2021 // с. – 84, рис. – 84, табл. – 5, додат. – 1, бібліогр. – 18.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ, НАПРУЖЕНІСТЬ МАГНІТНОГО ПОЛЯ, ПАРАЗИТНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЗВ'ЯЗКИ, ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД

В кваліфікаційній роботі проведено моделювання характеристик ЕС радіоелектронних засобів що підтвердело експериментальну залежність амплітуди напруги на другій лінії від амплітуди напруги на лінії, яка підключена до генератора.

В рамках моделювання параметрів ЕМС імпульсних джерел живлення були розроблені моделі двох імпульсних джерел живлення.

ANNOTATION

Theme of qualification work: "A method of increasing the noise immunity of radio equipment in cable communication networks " // Qualification work // Trach Nazariy Romanovych // Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, group RRM-61 // Ternopil, 2021 // p. - 84 fig. - 84, table. - 5, appendix. - 1, bibliogr. - 18.

Key words: ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, MAGNETIC FIELD STRENGTH, PARASITE ELECTROMAGNETIC COMMUNICATIONS, LABORATORY STAND.

In the qualification work the modeling of EC characteristics of electronic means was carried out, which confirmed the experimental dependence of the voltage amplitude on the second line on the voltage amplitude on the line connected to the generator.

As part of the modeling of the EMC parameters of switching power supplies, models of two switching power supplies were developed.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІ 1. ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	10
1.1 Аналіз можливостей пакету програм CST STUDIO SUITE.....	10
1.2 Висновки до розділу 1.....	15
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	16
2.1. Паразитні зв'язки в кабельних мережах.....	16
2.2. Випромінювання від кабелю.....	27
2.3 Випромінювання від кабелю 'вита пара'.....	31
2.4 Лабораторний стенд для демонстрації паразитних електромагнітних зв'язків ближнього поля.....	34
2.5 Модель стенда для демонстрації паразитних електромагнітних зв'язків ближнього поля.....	35
2.6. Висновки до розділу 2.....	40
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	41
3.1. Моделювання параметрів емс імпульсних джерел живлення.....	41
3.2. Модель імпульсного джерела живлення з мультівібратором.....	47
3.3. Стенд для демонстрації емісії ІРП на основі генератора тактової частоти.....	50
3.4 Модель стенда для демонстрації емісії ІРП на основі генератора тактової частоти.....	53
3.5 Аналіз можливих причин розбіжності результатів моделювання і вимірювань.....	57
3.3. Висновки до розділу 3.....	69
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	71
4.1. Охорона праці.....	71
4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	73
4.3. Висновки до розділу 4.....	76
ВИСНОВКИ.....	77

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79
Додаток А. Копія тези конференції.....	82

ВСТУП

Актуальність роботи. Широке використання різних електротехнічних і радіоелектронних засобів призводить до зростання рівнів ЕП, створених ними в навколишньому просторі. Ці поля є перешкодами для інших подібних пристроїв, погіршуючи умови їх функціонування і знижуючи ефективність застосування.

Згідно ГОСТ 50397-2011 термін «Електромагнітна сумісність» (ЕМС) визначається як здатність технічного засобу функціонального проектування із заданою якістю в заданій електромагнітній обстановці і не створювати технічним засобам електромагнітних завад.

Поняття «Електромагнітна сумісність» поширюється на методи і засоби захисту технічних засобів від впливу випадкових електромагнітних завад і ослаблення таких перешкод в їх джерелах і середовищі поширення.

Завдання забезпечення ЕМС виникла як наслідок науково-технічного прогресу в радіотехніці, електроніці та зв'язку з наступних причин:

- а) безперервне зростання загального числа радіоелектронної апаратури;
- б) недостатнє число вільних від перешкод радіоканалів в усіх освоєних діапазонах;
- в) зростання загального рівня перешкод від головним чином індустріальних джерел;
- г) ускладнення функцій і складу радіоелектронної апаратури.

Забезпечення ЕС РЕЗ відноситься до однієї з найбільш актуальних проблем сучасної техніки, так як процес розвитку електротехніки, електроенергетики, радіоелектроніки та засобів телекомунікацій підсилює залежність радіоперешкод на основі генератора тактової частоти.

Метою роботи є моделювання характеристик ЕС РЕЗ для оцінювання завадостійкості радіотехнічного обладнання у кабельних мережах зв'язку. Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання:

1. Проаналізувати причини виникнення паразитних зв'язки в кабельних мережах.

2. Дослідити методи та засоби для оцінювання завадостійкості радіотехнічного обладнання у кабельних мережах.

2. Дослідити методику проведення випробувань для вимірювання характеристик ЕС;

3. Провести моделювання характеристик ЕС РЕЗ.

4. Розробити модель лабораторного стенду для демонстрації паразитних електромагнітних зв'язків в кабельних мережах.

Об'єкт дослідження: процес моделювання електромагнітних сумісностей.

Предмет дослідження: методи та засоби для оцінювання завадостійкості радіотехнічного обладнання у кабельних мережах зв'язку.

Методи дослідження: пакет програм CST STUDIO SUITE для моделювання характеристик ЕС.

Наукова новизна отриманих результатів. В рамках моделювання параметрів ЕМС імпульсних джерел живлення були розроблені моделі двох імпульсних джерел живлення

Публікації. Викладені в роботі результати доповідалися та обговорювалися на 9-ій Науково-технічній конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» (м. Тернопіль, 8-9 грудня 2021 р.).

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Аналіз можливостей пакету програм CST STUDIO SUITE

Компанія CST створена у 1992 році, має великий набір програмних систем для діагностики електромагнітних кіл.

Оновлена версія програмного забезпечення CST STUDIO SUITE яка налічує в собі такі модулі:

(CST MWS) - устаткування для швидкісного і точного числового моделювання надвисоких та високочастотних радіо пристроїв (фільтрів, антен, підсилювачів, багат шарових і одношарових структур), та для дослідження проблем коректності сигналів і ЕС.

(CST EMS) - устаткування для створення постійних і малочастотних електромагнітних полів (ЕП) в радіо пристроях. В модулі є можливість аналізу внутрішніх і зовнішніх струмів, електричних та магнітних полів.

(CST PS) - спеціалізоване устаткування для дослідження руху активних частинок в ЕП і розроблення таких приладів, як електронні пушки, магнетрони, катодна променева пушка.

(CST CS) - спеціалізоване устаткування для створення електромагнітних ефектів в провідниках, що дозволяє оптимізувати масу та розмір, витих пар, а також “важких” джгутів з безмежним числом дротів.

(CST PCBS) - спеціалізоване устаткування, дозволяє обробляти аналізи коректності сигналів і різномодульованих оцифрованого сигналу, цифрово-аналогового перетворювача та аналогового-цифрового перетворювача.

(CST BC) - спеціалізоване устаткування, дозволяє обробляти імпорт та експорт “розводки”, створених в різноманітних системах, і знаходити у них усі поширені та непоширені недоліки електро-магнітної індукції по введенню вибраних обмежень.

(CST MPS) - спеціалізоване устаткування для дослідження високо-градусних та механічно завантажених вузлів.

(CST DS)- устаткування, що допомагає реалізувати даний пристрій на різноманітних частинках та проектувати різні не суміжні вузли і пізніше реалізувати вхідну інформацію в єдине ціле. Крім того, маємо функцію взаємного моделювання електричної схеми та 3D моделі.

Стрімкість і коректність змодельованого сигналу прямо взаємодіє від вибору підрахованого способу аналізу. (CST SS) містить великий склад лічильників. Для різних потреб та завдань можна вибрати лічильник, який дасть можливість зробити пристрій найбільш досконалим. Розглянемо перелік систем обчислень CST .

(CST SS) містить нижче перераховані обчислювальні технології:

а) Лічильні технології для області високочастотних систем:

1) Процесор в хмарній області (Transient Solver) – об'єднані завдання;

2) Процесор в частотній області (FDS) - об'єднані завдання;

3) Процесор з інтегрованим мікроконтролерами (Integral Equation Solver) – з можливістю використання багатозадачних завдань , RCS;

4) Асимптотичний лічильник (Asymptotic Solver) - електронно складна структура, RCS;

5) Лічильник резонансних моделей (Eigenmode Solver) -функціональний резонанс;

6) Фільтр синтезування (Filter Designer 2D) - синтез і аналіз СВЧ фільтрів;

7) Фільтр синтезування (Filter Designer 3D) - синтез і аналіз СВЧ фільтрів з об'єднаними великими резонаторами.

б) Технології обчислення для низькочастотних потреб:

1) Електростатичний і магнітостатичні обчислювачі;

2) Стаціонарне Current Solver - дослідження постійних I токів;

3) Процесор в хмарному середвищі (Transient Solver) - задачі з нелінійними складовими;

4) Frequency Domain Solver - вихреві токи, токи змещення.

в) Технології обчислення для автоматизованого електронного обладнання:

1) процесор з частинними схемами заміщення (PEEC Solver) - одношарні плати;

2) процесор, що використовує лінійну матрицю передавання (TLM Solver) - цілісність сигналу;

3 Обчислювач компонентів в частотному вимірі (3D FEFD Solver) - цілісність живлення;

4) Контроль принципів проектування (EMC і SI Rule Check) - контроль граничних допусків на SI та EMC платах.

г) Технології обчислення для динаміки регіону:

1) Процесорна наступна частина (Tracking Solver) – електронне низькочастотне обладнання;

2) Processor In Cell Processor (PIC Solver) – пристрій мікрохвильові;

3) Wakefield Solver - для прискорення вимірювального обладнання.

г) Технології обчислення ЕС:

1) Процесор, що використовує матрицю ліній передачі (TLM Solver).

2) Кабельні мережі - Cable Solver.

3) Перевірка правил EMC на платах.

Розглянуті вище модулі забезпечують точний і багатогранний підхід до розв'язання задач з ЕС.

Далі використовується пакет програм CST STUDIO для розв'язання задач з ЕС при проектуванні безпроводового маршрутизатора. Такі підходи використовуються для моделювання побутових приладів.

Проектуючи друковані плати, потрібно дотримуватися правил щоб уникнути неприємностей з ЕС.

На рис. 1.1 показано в мікрополоскову лінію з діелектричною проникністю 4,2 що знаходиться на краю підложки.

З одного боку лінії підключається навантаження 50 Ом, а з іншого боку - напруга. Розрахунок проводиться методом остаточного інтегрування у програмному середовищі CST MWS. Розглядаючи рисунок 1.1 з права на графіку видно, як положення мікросмужкової лінії залежить від випромінювання поля. Із переміщенням лінії інтенсивність електричного поля, що випромінюється, збільшується на 30 дБ, що може підвищити заводозахищеність приладу.

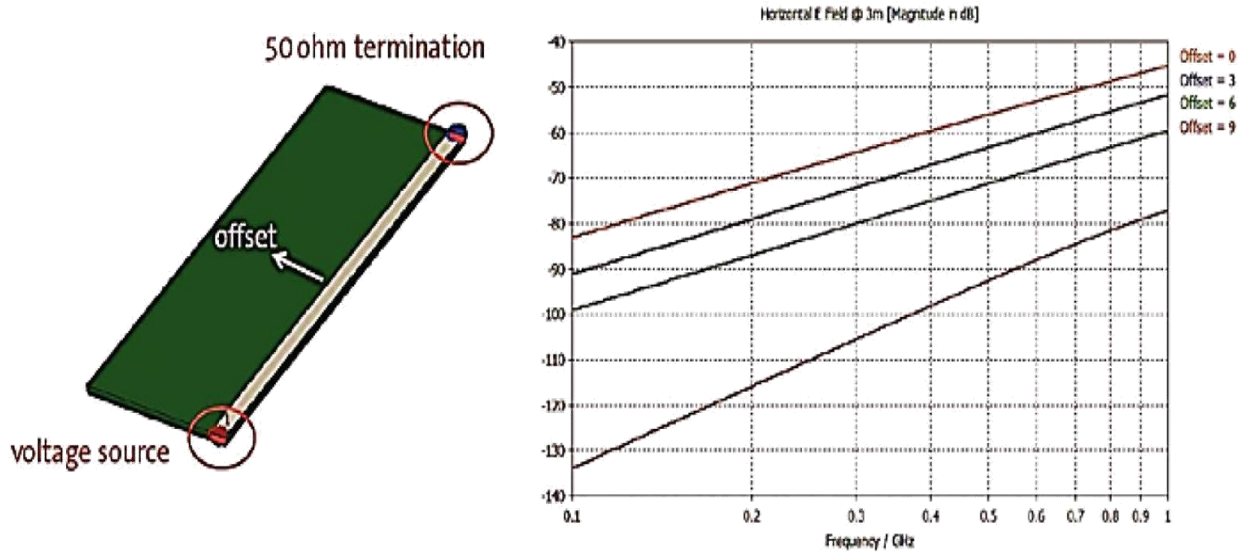


Рис. 1.1. Величина зміщення мікросмугової лінії від електричного поля

Моделювання в пакеті CST дає змогу отримувати візуалізацію розподілу ЕП на корпусі маршрутизатора (рис. 1.2), які можуть сприяти заваді приладу.

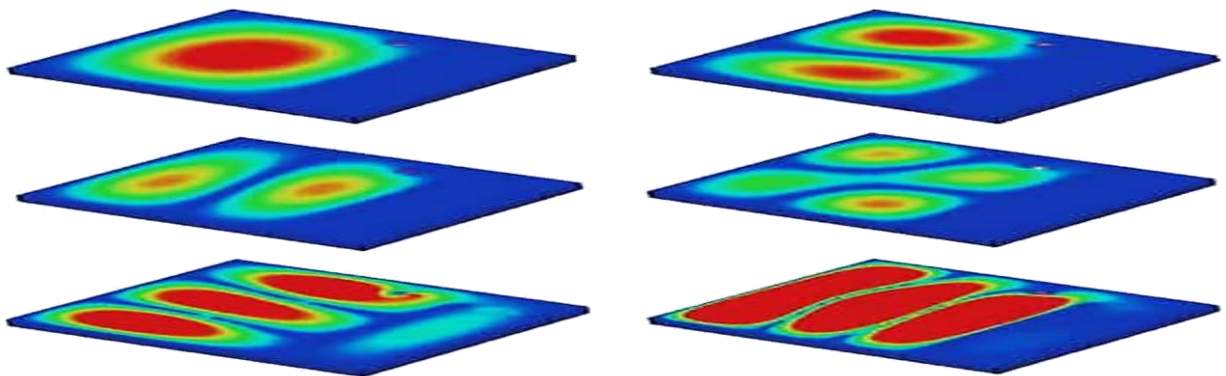


Рис. 1.2. Візуалізація розподілу ЕП

Із рисунку 1.3. видно зміщення джерела під кутом корпусу до краю призводить до різного розподілу ЕП.

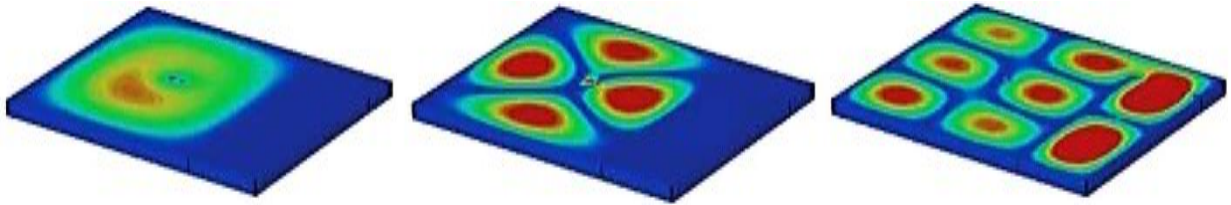


Рис. 1.3. Розподіл ЕП приладу від джерела, яке розташоване у центрі приладу.

Під час розрахунку, дуже важливо враховувати протікання ЕП, оскільки вони можуть протікати через отвори, шви, та панелі приладу. Таке моделювання займає багато часу. Тому, існує альтернатива моделювання з використанням компактних моделей. Такі моделі, що використовують метод матриці ліній передачі, замінюються тонкими структурами, які так само взаємодіє з полями.

На Рисунку 1.4 порівнюються докладні та компактні моделі вентиляційних решіток із шестигранними отворами.

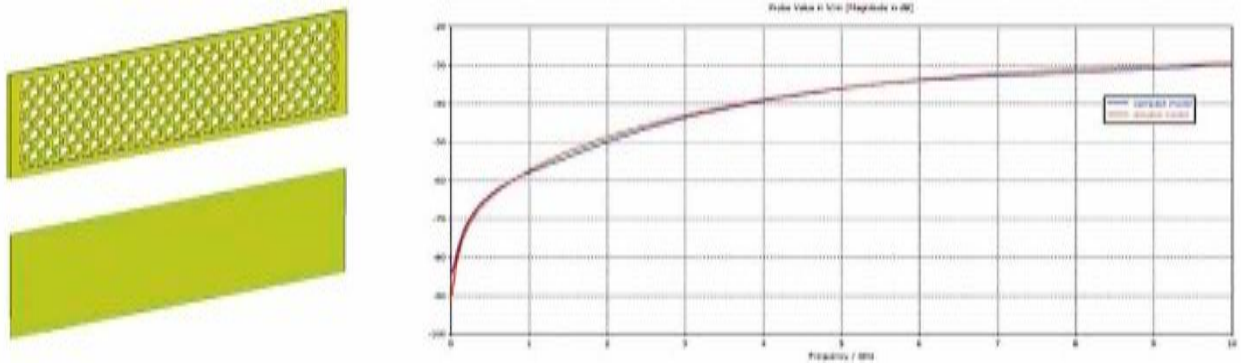


Рис. 1.4 - Модель вентиляційної решітки

Використовуючи модуль CST CS можна моделювати кабелі різними підходами, які мають має свої переваги та недоліки. Методи моделювання кабелів наведені у таблиці 1.1.

Методи моделювання кабелів

Електростатичне моделювання	Електростатичне моделювання може бути використане для розрахунку вкладу індуктивності та ємності опору в лінії. Такий метод швидкий і досить точним проте тільки для розрахунку на постійній напрузі
Повнохвильове моделювання	Повнохвильове 3D моделювання дозволяє моделювати низькочастотні ефекти, дисперсію сигналів при їх розповсюдженні по лінії. Цей метод є дуже точним для широкосмугових сигналів, але є дуже повільний чим спеціалізоване моделювання кабелів.
Спеціалізоване моделювання кабелів	Моделювання реалізовується шляхом рішення двохвимірного поля в поперечному сеченні кабелю, метод застосовується для імітації розповсюдження поля вздовж лінії. Цей метод є більш точним та ефективним

1.2. Висновки до розділу 1

У розділі проаналізовано можливості моделювання пакету програм cst studio suite, зокрема приділено увагу розподілу ЕП на платі, або корпусі приладу. Розглянуто методи моделювання кабелів з використанням модуля (CST CS).

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1. Паразитні зв'язки в кабельних мережах

Більшість електронних апаратних засобів містять елементи, здатні приймати сигнали через компоненти, які ведуть себе як антени, наприклад, кабелі, провідники друкованих плат, внутрішні провідні і механічні конструкції. Ці елементи можуть ненавмисно передавати енергію через електричне, магнітне або ЕП в ланці, з якими вони мають зв'язок.

Механізми паразитних зв'язків детально розглянуті в (2.1) взаємодія двох дротів в магнітному полі (Рисунок 2.1). Згідно закону повного струму

$$\int_0^{2\pi} H ds = I, \quad (2.1)$$

де H - напруженість магнітного поля навколо дроту, по якому протікає струм I , А/м. На відстані r від струмопровідного дроту напруженість магнітного поля дорівнює

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}. \quad (2.2)$$

Магнітне поле, що утворюється навколо струмопровідного проводу p , охоплюють провід q . Поверхня нульового потенціалу не впливає на магнітне поле, якщо матеріал, з якого вона виконана, не має феритової основи.

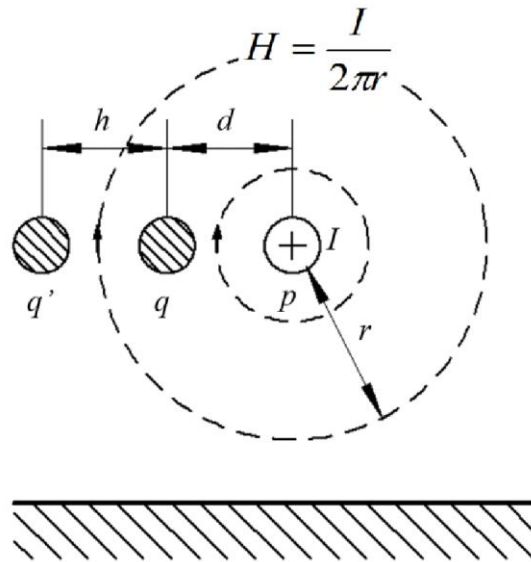


Рис. 2.1. Магнітний зв'язок між джерелом перешкод (провід p) і рецептором перешкод (провід q).

Механізм магнітного зв'язку описується законом Фарадея:

$$\int E ds = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt} = U, \quad (2.3)$$

де E - напруженість електричного поля, В/м;

U - напруга, індукована в ланці, утвореної q - q' , В;

$$\Phi = \int B dA, \quad (2.4)$$

де Φ - магнітний потік, що перетинає петлю площею A , охоплено дротами q - q' ;

$$B = \mu H, \quad (2.5)$$

де μ - магнітна проникність середовища Гн/м;

H - напруженість магнітного поля А/м.

На рисунку 2.2 показані два випадки магнітного зв'язку. Провід 2 і

«заземлення» утворюють ланку, площа петлі якої дорівнює:

$$A = h_2 l, \quad (2.6)$$

де h_2 - відстань від провідника до поверхні, м;

l - довжина провідника, м.

Магнітне поле дротів розміщені перпендикулярно площині петлі. Провідник 3 і «заземлення» утворюють ланцюг з площею петлі рівній

$$A = h_3 l, \quad (2.7)$$

де h_3 - відстань від провідника до поверхні, м; l - довжина провідника, м.

З чого виходить, магнітне поле провідника 1 перетинає площину цієї петлі під певним кутом.

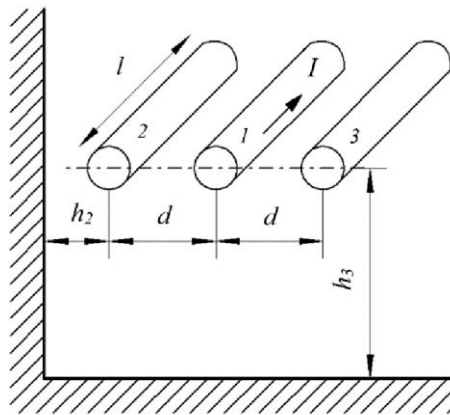


Рис. 2.2. Максимальний і мінімальний магнітна зв'язок:

1 - джерело перешкод; 2 - провід з максимальним зв'язком; 3 - провід з мінімальним зв'язком.

Після підстановок в (2.2), (2.5) в (2.4) отримаємо:

$$\Phi = \int_d^{d+h} B l dr = \mu l \int_d^{d+h} H dr = \frac{\mu l I}{2\pi} \int_d^{d+h} \frac{dr}{r} = \frac{\mu l I}{2\pi} \ln\left(\frac{d+h}{d}\right);$$

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\mu l}{2\pi} \ln\left(\frac{d+h}{d}\right) \frac{dI}{dt} = -\mu l f I \ln\left(\frac{d+h}{d}\right),$$
(2.8)

де $\left|\frac{dI}{dt}\right| = \left|\frac{d}{dt}(I \cos(\omega t))\right| = \omega I = 2\pi f I,$

U - напруга, наведене в даній ланці, В;

μ - магнітна проникність середовища Гн/м;

l - довжина ланки, м;

I - сила струму, А;

f - частота, Гц.

Згідно (2.8) напруга U , наведено в розглянутій ланці, збільшується при збільшенні довжини ланки l , магнітної проникності середовища μ , сили струму I і її частоти. Напруга зменшується при розведенні провідників на відстань $d \gg h_2$. Зростання напруги U , що наводиться на навантаженні Z_{l2} , як показано на рисунку 2.3, обмежується самоіндукцією:

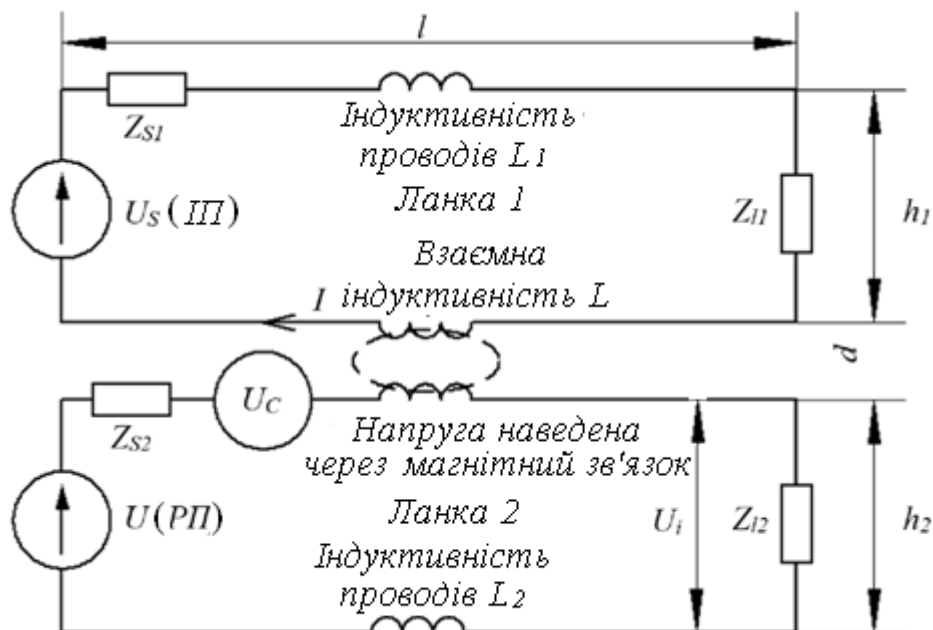


Рис. 2.3. Еквівалентна схема індуктивного (магнітного) зв'язку між проводами.

$$U_i = \frac{Z_{l2}U_C}{Z_{S2} + Z_{l2} + j\omega L_2} = \frac{Z_{l2}U_C}{Z_{S2} + Z_{l3}} \quad (2.9)$$

при $\omega L_2 \ll Z_{S2} + Z_{l2}$,

$$U_i = \frac{Z_{l2}U_C}{2\pi f L_2} \text{ при } \omega L_2 \gg Z_{S2} + Z_{l2}. \quad (2.10)$$

Підставляючи рівняння (2.8) в рівняння (2.9) і (2.10) і отримаємо вираз для повного перехідного опору .

$$Z_T = \frac{U_i}{I} = \frac{Z_{l2}\mu l f}{Z_{S2} + Z_{l2}} \ln\left(\frac{d+h}{d}\right) \text{ при } \omega L_2 \ll Z_{S2} + Z_{l2}, \quad (2.11)$$

$$Z_T = \frac{Z_{l2}\mu l}{2\pi L_2} \ln\left(\frac{d+h}{d}\right) \text{ при } \omega L_2 \gg Z_{S2} + Z_{l2}. \quad (2.12)$$

Коефіцієнт зв'язку Z_A ланок джерела перешкод та рецептора можна виразити так

$$Z_A = \frac{U_i}{U_S} = \frac{Z_{l2}\mu l f}{(Z_{S2} + Z_{l2} + j\omega L_2) \cdot (Z_{S1} + Z_{l1} + j\omega L_1)} \ln\left(\frac{d+h}{d}\right), \quad (2.13)$$

де U_S - напруга джерела енергії (перешкод) ланки 1.

При $L_2=L_1$ і $Z_{S1} \approx Z_{l2} \approx Z_{S2} \approx Z_{l2} \approx Z$ рівняння (2.13) матиме наступний вигляд

$$Z_A = \frac{U_i}{U_S} = \frac{Z_{l2}\mu l f}{4Z} \ln\left(\frac{d+h}{d}\right) \text{ при } \omega L \ll 2Z, \quad (2.14)$$

$$Z_A = \frac{U_i}{U_S} = \frac{Z\mu l}{4\pi^2 fL^2} \ln\left(\frac{d+h}{d}\right) \text{ при } \omega L \gg 2Z \quad (2.15)$$

без врахування фази

Для зменшення магнітної зв'язку між ланками, показаними на рисунку 2.3, відповідно до рівнянь (2.8), (2.9), (2.13) потрібно наступне:

а) Зменшити напругу джерела U_S або струм I в ланцюзі 1. Якщо внутрішній опір джерела напруги U_S мало, потрібно збільшити повний опір ланки, але це призведе до зростання електричного зв'язку.

б) Зменшити площу петлі, утвореної ланкою 2 (рисунок 2.3, 2.4, а), зменшуючи довжину l або відстань між проводами h або і те, і інше. Зазвичай кабель прокладають по найкоротшому шляху, тому l можна істотно зменшити. Суттєво зменшує розмір h укладання ізолюваного проводу безпосередньо на «заземлення» (рисунок 2.4, б) [7].

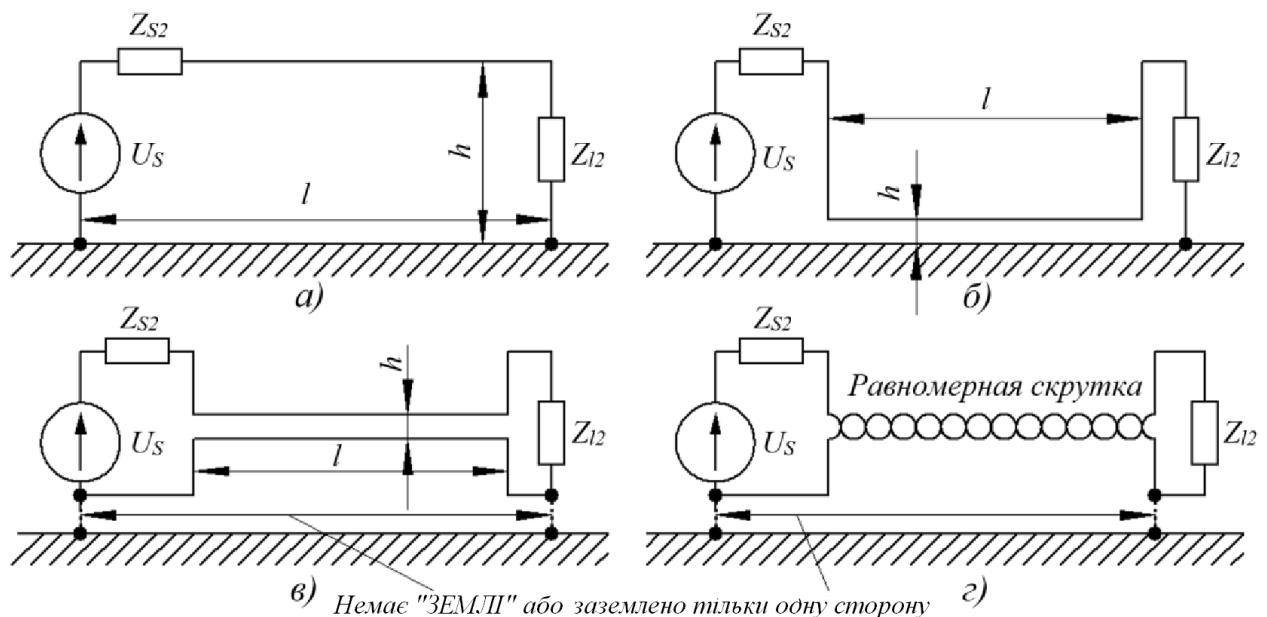


Рис. 2.4. Зменшення площі петлі $A = lh$ магнітно - пов'язаних ланок і різні варіанти заземлення.

Ще сильніше зменшити магнітний зв'язок можна, використовуючи в якості «землі» окремий провід (рисунок 2.4, в), так як в цьому випадку немає зв'язку через загальних ділянок ланцюгів. Бажане скручування прямого і зворотного

провідника, так як в цьому випадку напруга, наведене на сусідніх ділянках скрученої лінії, однакових по величині, але протилежно за знаком (Рисунок 2.4, г).

в) Максимально розвести ланку 1 і 2, так, щоб виконувалися умови для рівняння (2.13):

$$d \gg h \text{ и } \ln\left(\frac{d+h}{d}\right) \rightarrow \ln l = 0, \quad (2.16)$$

де h - відстань від провідника до поверхні, м;

d - відстань між провідниками, м.

г) Передавати сигнали на низьких частотах або постійним струмом.

д) Використовувати екранований провід в магнітному екрані.

е) Включити в ланку 2 (рецептор перешкод) диференційний підсилювач.

У разі використання окремого заземлюючого (нульового) проводу (Рисунок 2.4, в, г) виникає проблема оптимального заземлення. Якщо заземлюються обидва кінці нульового проводу, то це еквівалентно появі другого дроту, опір якого менше, ніж у «заземленого» дроти. Таким чином він стає не ефективним.

Взаємодія двох дротів в електричному полі розглянуто в [7]: «Розглянемо взаємодію двох дротів в електричному полі (Рис. 2.5). Крім прямого ємнісного зв'язку C_C між ними існує паразитний ємнісний зв'язок через «заземлення» (C_1 і C_2).

Використовуючи еквівалентні схеми на рисунку 2.6, запишемо перехідне загасання

$$\frac{U_i}{U_S} = \frac{Z\omega C_C}{Z\omega(C_C + C_2) - j2}, \quad (2.17)$$

$$\frac{U_i}{U_S} = \frac{Z\omega C_C}{2} \quad (2.18)$$

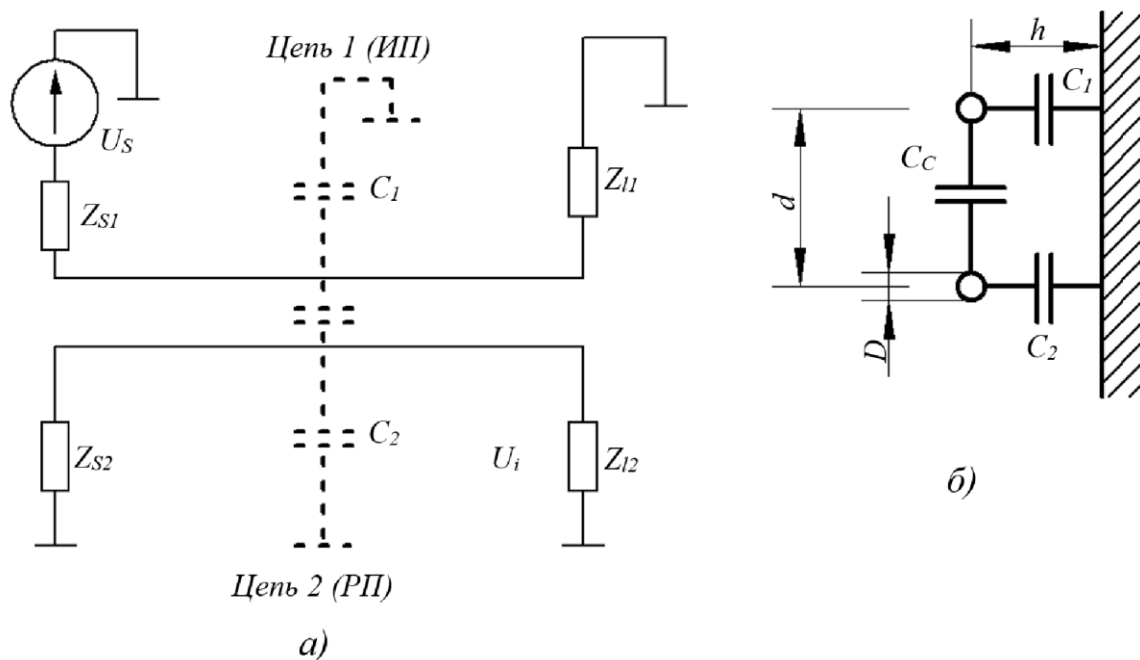


Рис. 2.5. Ємнісний зв'язок між дротами: а - вид збоку; б - вид з торця.

на низьких частотах, де $Z\omega(C_C + C_2) \ll 2$,

$$\frac{U_i}{U_s} = \frac{C_C}{C_C + C_2} \quad (2.19)$$

на високих частотах, де $Z\omega(C_C + C_2) \gg 2$.

Ємність між дротами, пФ/м, дорівнює:

$$C_C \approx \frac{\pi\varepsilon}{\ln(2d/D)} \text{ при } \frac{d}{D} \gg 1, \quad (2.20)$$

$$C_C \approx \frac{12,2}{\ln(2d/D)},$$

де ε - діелектрична проникність ($\varepsilon = 8,85$ пФ/м для повітря);

d - відстань між дротами, м;

D - діаметр дроту, м.

Якщо нерівність $d/D \gg 1$ не виконується, то замість $\ln(2d/D)$ в (2.20) потрібно підставити $\operatorname{arcch}(d/D)$.

Підставляючи в (2.17) значення величин, отримуємо:

де ε - діелектрична проникність ($\varepsilon = 8,85$ пФ / м для повітря);

d - відстань між проводами, м;

D - діаметр дроту, м.

Підставивши значення в (2.17) ми отримаємо:

$$\frac{U_i}{U_S} = \frac{11,6Zfl \cdot 10^{-12}}{\lg(2d/D)} \quad \text{при } Z\omega(C_C + C_2) \ll 2, \quad (2.21)$$

$$\frac{U_i}{U_S} = \frac{4hd + D(2h - d)}{8hd} \quad \text{при } Z\omega(C_C + C_2) \gg 2 \text{ и } d/D, \quad (2.22)$$

$$h/D \gg 2.$$

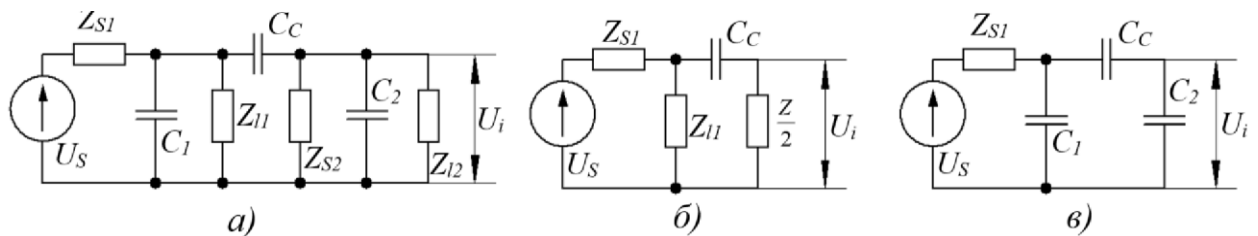


Рис. 2.6. Еквівалентні схеми ланок, зображених на рисунку 2.5

З наведених рівнянь видно, що для зменшення електричних перешкод необхідно:

а) Зменшувати напругу джерела перешкод U_S в ланці 1 і зважаючи на ланку 2 (в наслідок зменшення опору ланки 1 виникає збільшення перешкод через магнітного зв'язку).

б) Ізолювати ланку 1 і 2, щоб зменшити ємність C_C і забезпечити співвідношення $d \gg D$.

в) Зменшувати ємність C_C , зменшуючи довжину лінії (довгу лінію, крім того, важче екранувати на високих частотах).

г) Зменшувати ємність C_C за допомогою екранування, наприклад циліндра Фарадея (рисунок 2.7). На рисунку 2.7 показані два дроти над поверхнею нульового потенціалу. Провід 2 розміщений в екран - циліндр Фарадея, цей екран заземлений. Таким чином, утворюється ємність між дротами 1 і $C'_C > C_C$ заземленим екраном дроти 2.

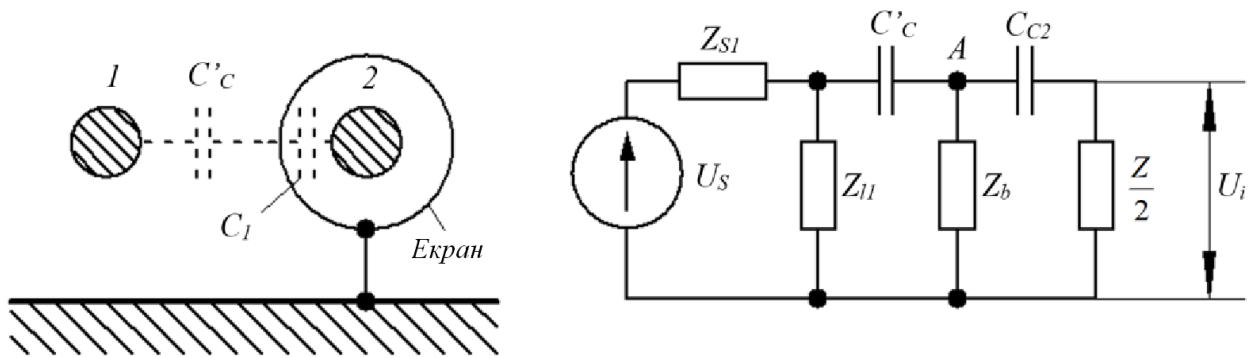


Рис. 2.7. Еквівалентна схема ланки з одним екранованим дротом: C_1 - ємність між дротом 2 і екраном; A - точка з'єднання з екраном; Z_b - мало омний опір заземлючої перемички.

Як бачимо з еквівалентної схеми для двох екранованих дротів (рисунок 2.8), екран на дроті 2 додатково зменшує ємність зв'язку (в $Z_b^2 / X_{C1} X_C''$ разів).

Спосіб заземлення визначається необхідністю, по перше, уникати появи суміжного магнітного зв'язку на низьких частотах по друге, скорочувати відстань між точками заземлення до величини, яка менша найкоротшої довжини хвилі робочого діапазону.

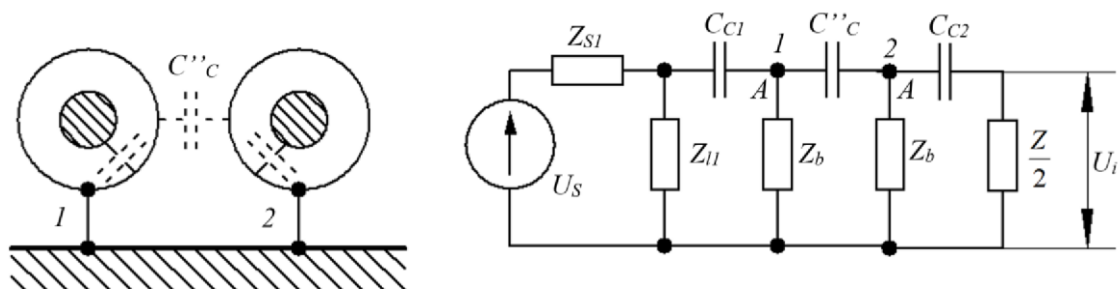


Рис. 2.8. Еквівалентна схема ланцюга з двома екранованими проводами: A - точка з'єднання з екраном; Z_b - низько омні опору заземлюючих перемичок.

В такий спосіб: екранування скрученої пари: «У першому випадку (Рисунок 2.9, а), коли ланцюг заземлюється тільки на одному кінці (або не заземлюють взагалі), заземлення екрана навіть на обох кінцях не викличе істотного зміни магнітної зв'язку, якщо виконується умова:

$$l \ll \lambda$$

де l - довжина провідника, м; λ - довжина хвилі, м.

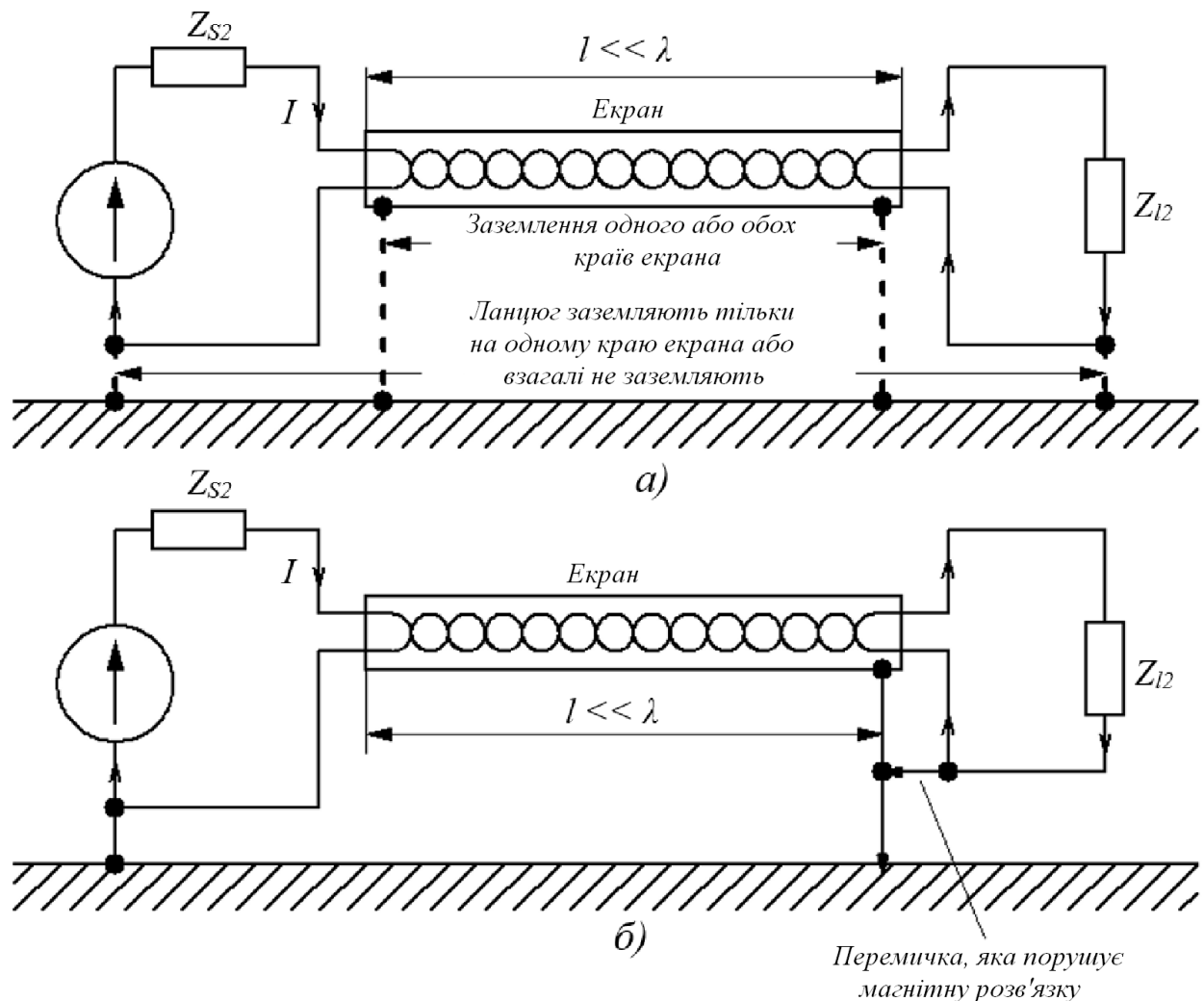


Рис. 2.9. Заземлення екрану і магнітне екранування.

У другому випадку, коли ланка заземлена на передавальному кінці, а екран на приймальному, електричне екранування забезпечується при $l \ll \lambda$. Оскільки в

даній схемі зворотний провід з'єднаний з точкою заземлення екрана, то частина струму замикається через «заземлення» разом з струмами інших ланок, через що порушується магнітна розв'язка.

2.2. Випромінювання від кабелю

Модуль CST CS дозволяє моделювати електромагнітні ефекти в кабелях, оцінювати напруги в різних точках кабелів, тільки через певні провідники, S-параметри, а також взаємне наведення провідників один на одного. На рисунку 2.10 показана модель досліджуваного кабелю довжиною 2 метри, розташованого над поверхнею.

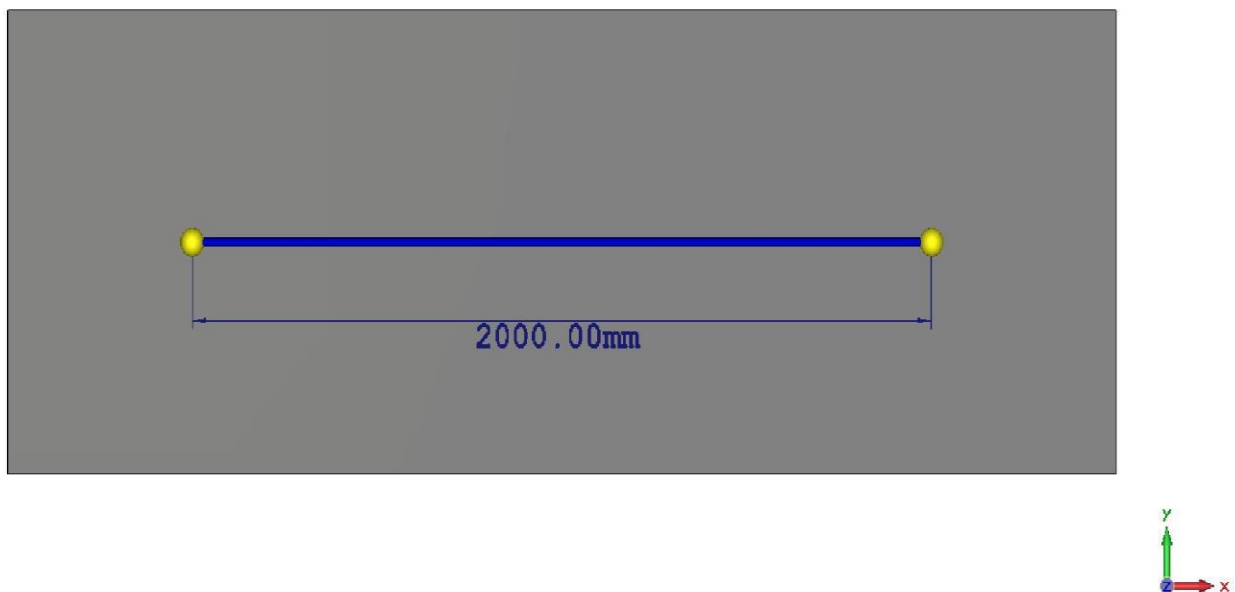


Рис. 2.10. Об'ємна модель кабелю над поверхнею.

CST дозволяє моделювати внутрішню будову кабелю, і також включає вбудовану бібліотеку кабелів. На рисунку 2.11 наведено зображення поперечного перерізу досліджуваного кабелю типу «вита пара».

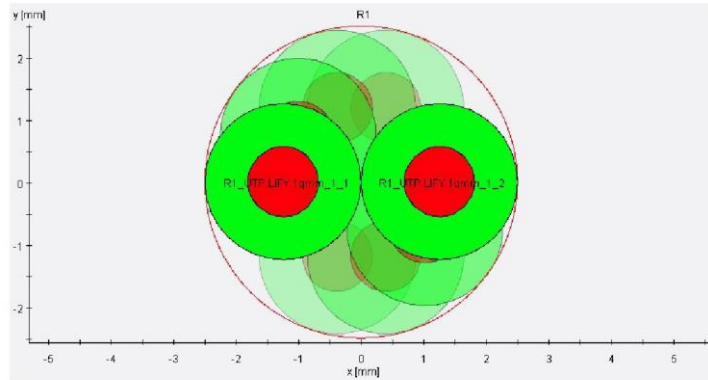


Рис. 2.11. Перетин моделі кабелю.

Особливістю пакету CST STUDIO SUITE є можливість гібридного моделювання, можливість одночасного моделювання тривимірної структури в модулі MICROWAVE STUDIO (CST MWS) і моделювання у вбудованій програмі Schematic (рисунок 2.12).

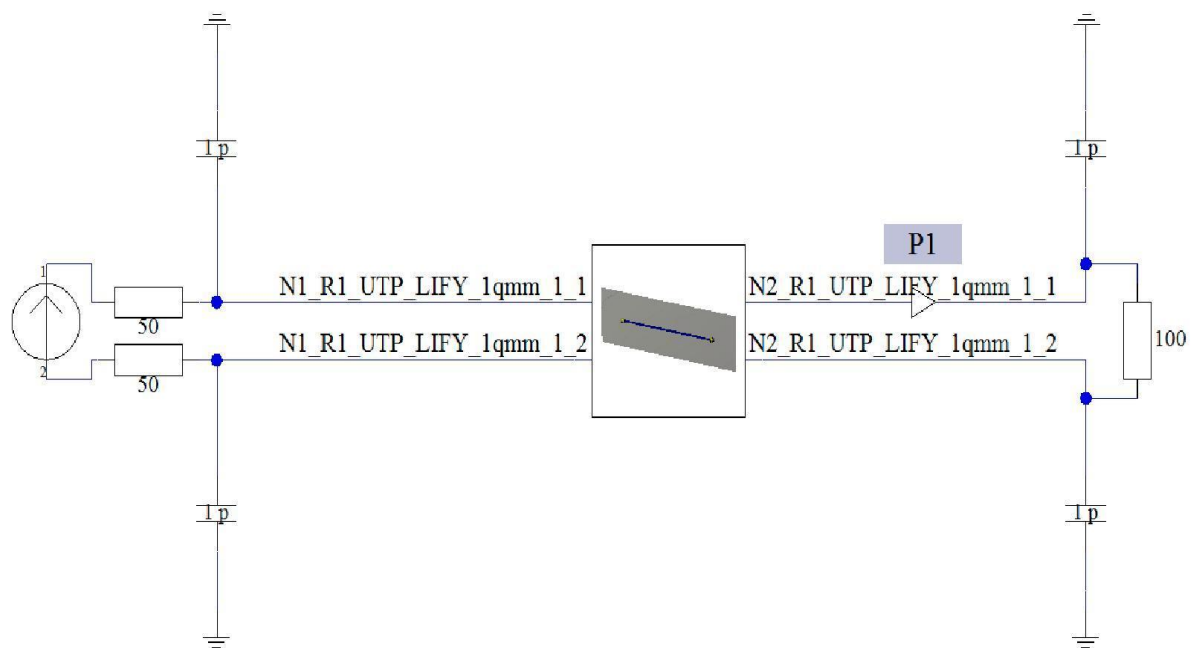


Рис. 2.12. Модель в Schematic.

На рисунку 2.13 наведено графічне зображення розподілу поля, а на рисунку 2.14 зображення розподілу поверхневого струму.

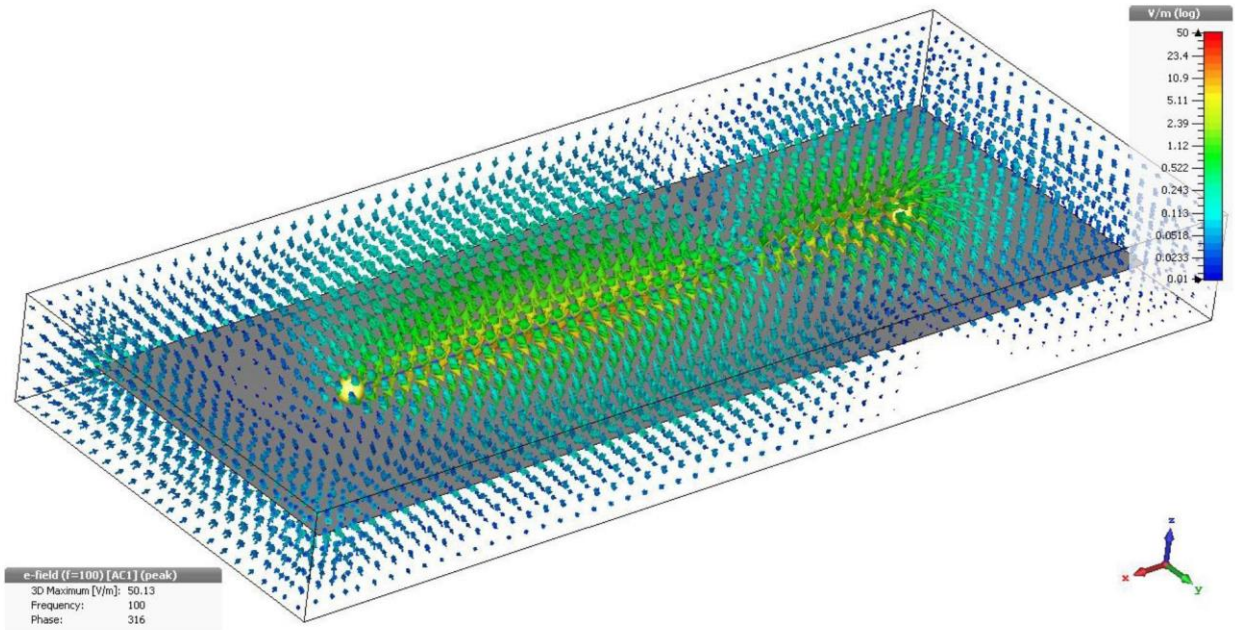


Рис 2.13. Графічне зображення розподілу поля.

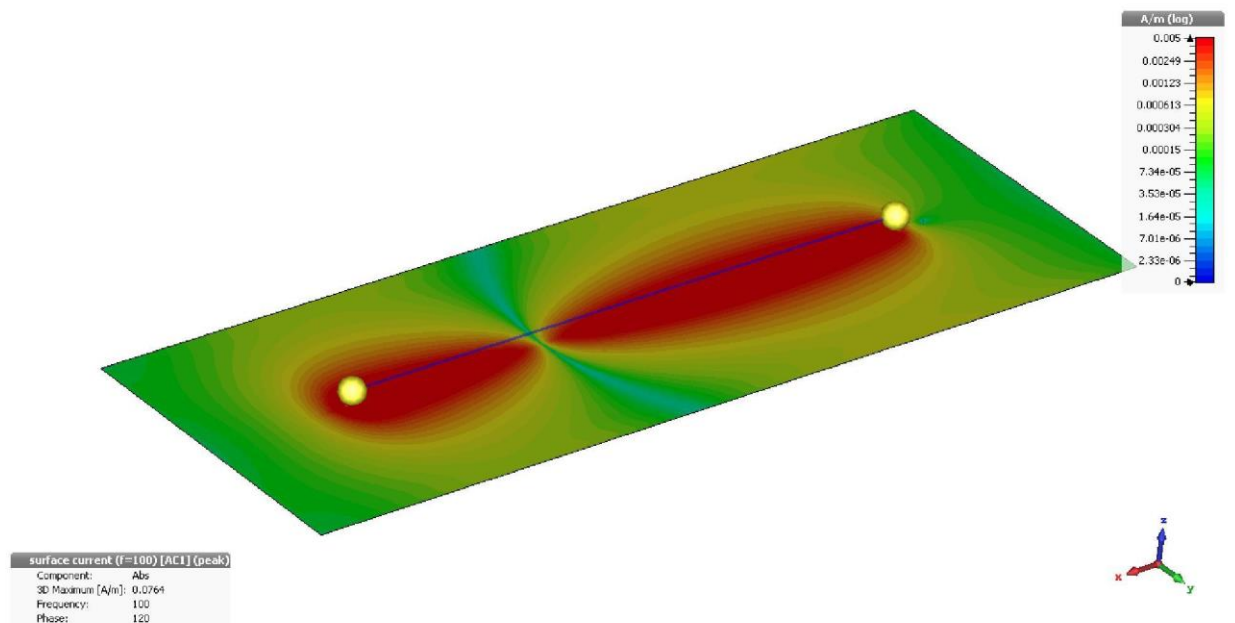


Рис. 2.14. Графічне зображення розподілу поверхневого струму.

Для оцінки рівня випромінювання від кабелю на відстані від нього встановлюється прототипи ближнього поля, як показано на рисунку 2.15.

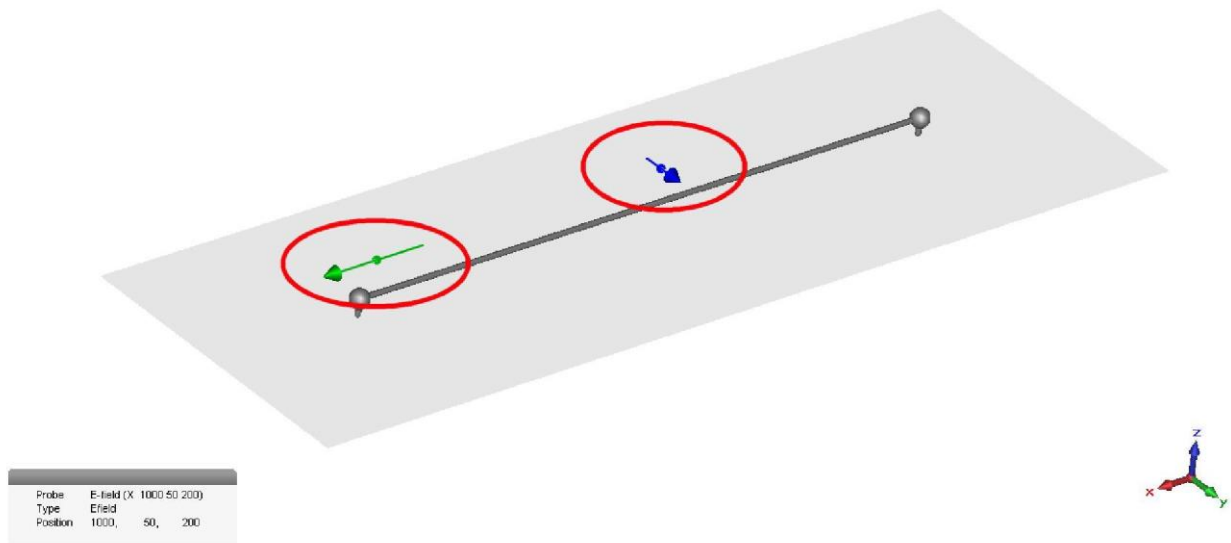


Рис. 2.15. Розташування прототипів поля на тривимірній моделі.

Дані з датчиків поля дозволяють оцінити частотні залежності напруженості електричного (2.16) і магнітного поля (2.17), створювані відрізком кабелю.

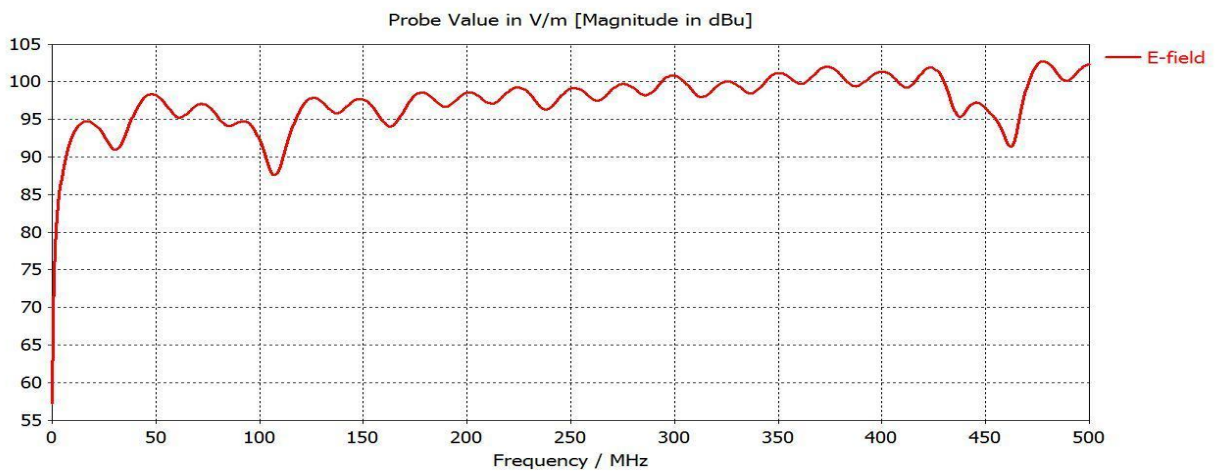


Рис. 2.16. Частотна залежність напруженості електричного поля.

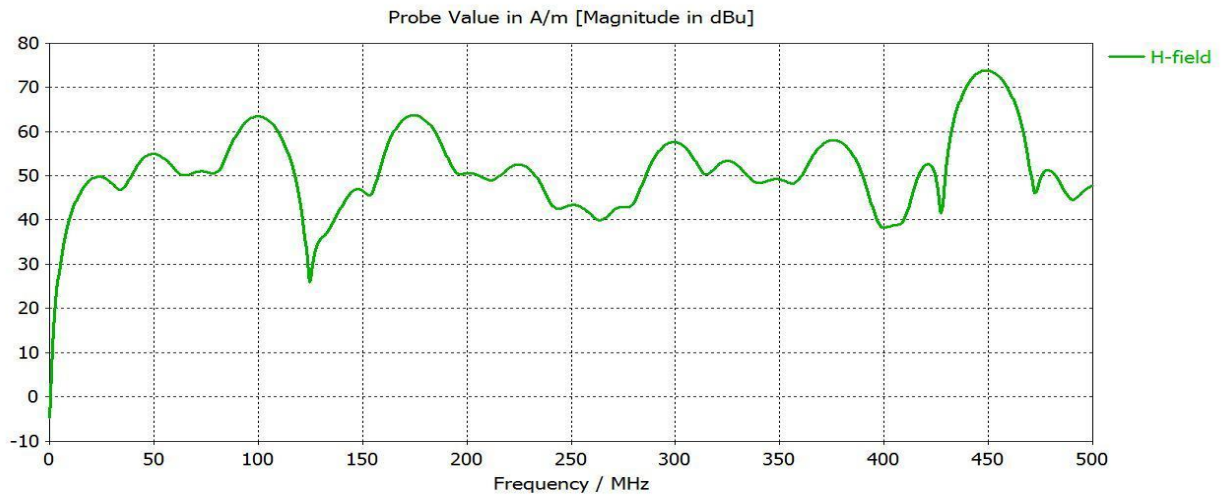


Рис. 2.17. Частотна залежність напруженості магнітного поля.

2.3. Випромінювання кабелю типу «вита пара»

Модель, показана на рисунку 2.18, ілюструє роботу кабелю в ролі рецептора перешкод. Модель складається з кабелю і провідній площині.

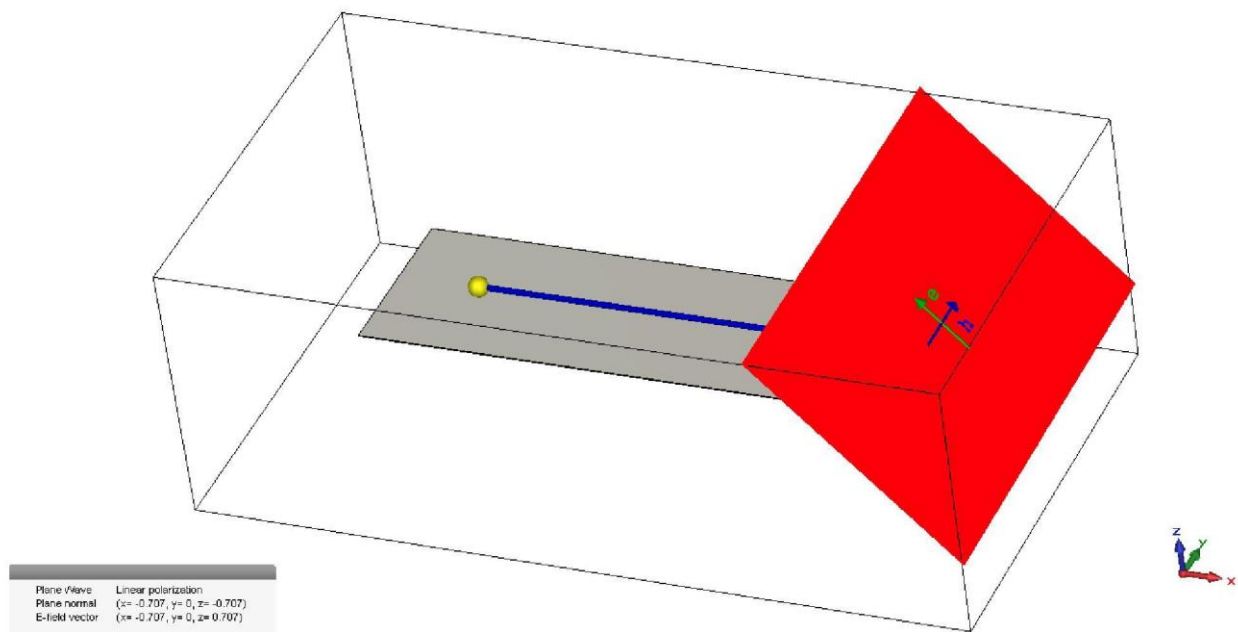


Рис. 2.18. Об'ємна модель кабелю типу «вита пара» над поверхнею.

Для моделювання опромінення використовується плоска хвиля (інструмент Plane Wave). Плоска хвиля що надходить на конструкцію моделі під кутом 45 градусів. Для отримання частотних залежностей наведених напруг на

схему встановлених вимірювальний пробник (рисунок 2.19).

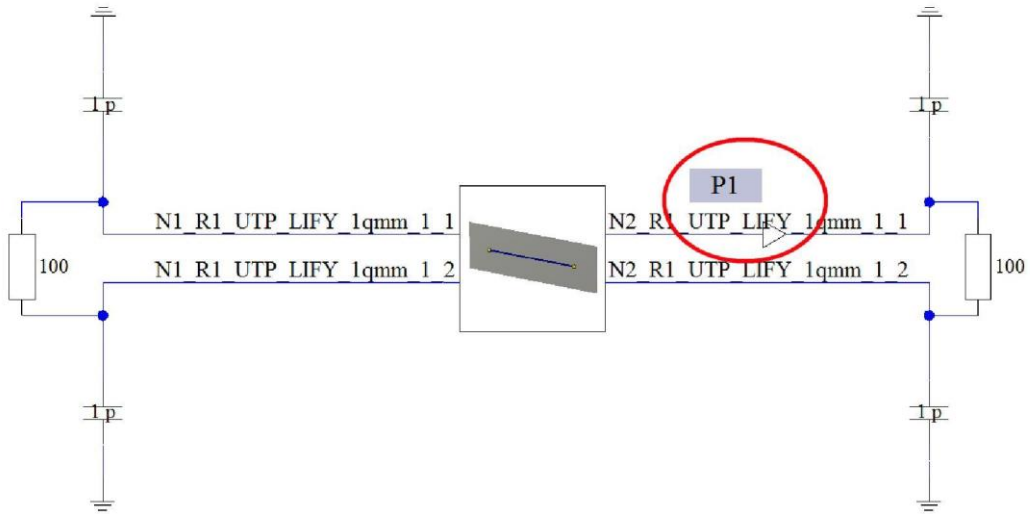


Рис. 2.19. Модель в Schematic з встановленим пробником

На малюнках 2.20 і 2.21 показані графічні зображення поширення електричного поля і поверхневого струму.

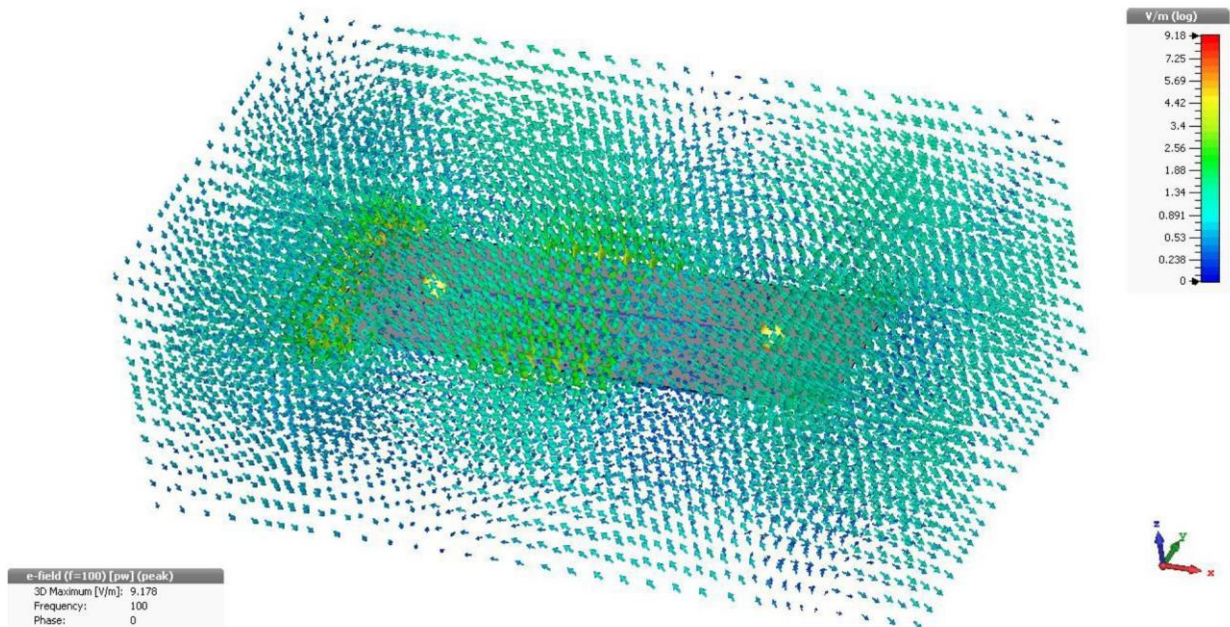


Рис. 2.20. Графічне зображення розподілу поля в обсязі моделі.

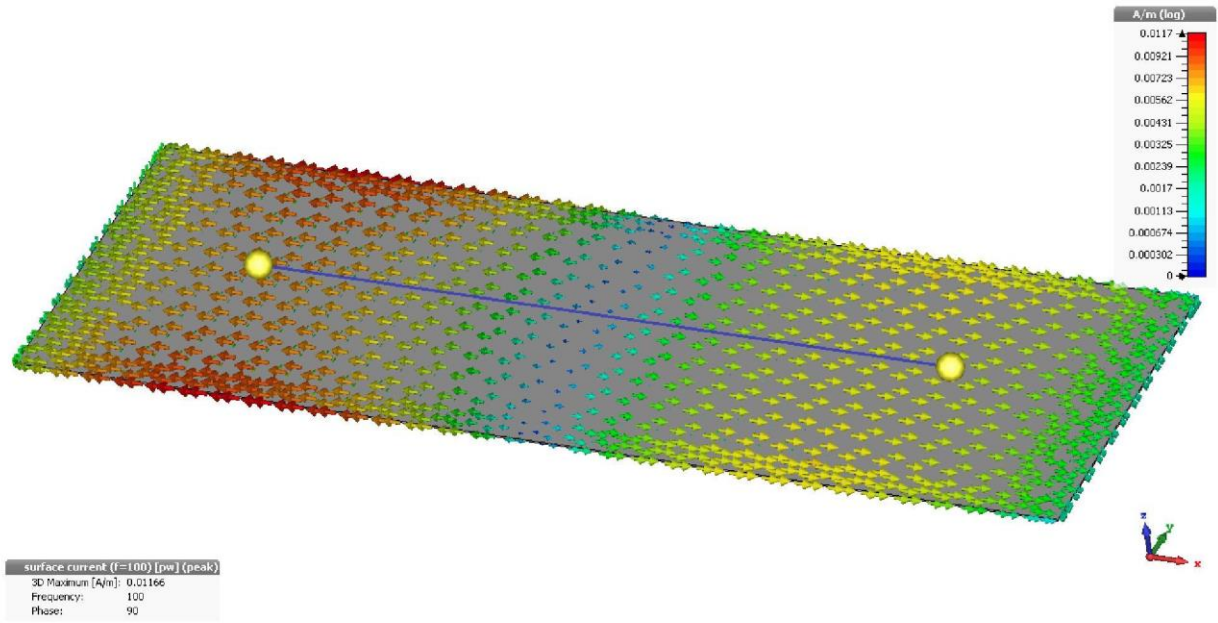


Рис. 2.21. Графічне зображення поширення поверхневого струму на провідній поверхні.

На рисунку 2.22 наведено отримані частотні залежності наведеної напруги в дБмкВ.

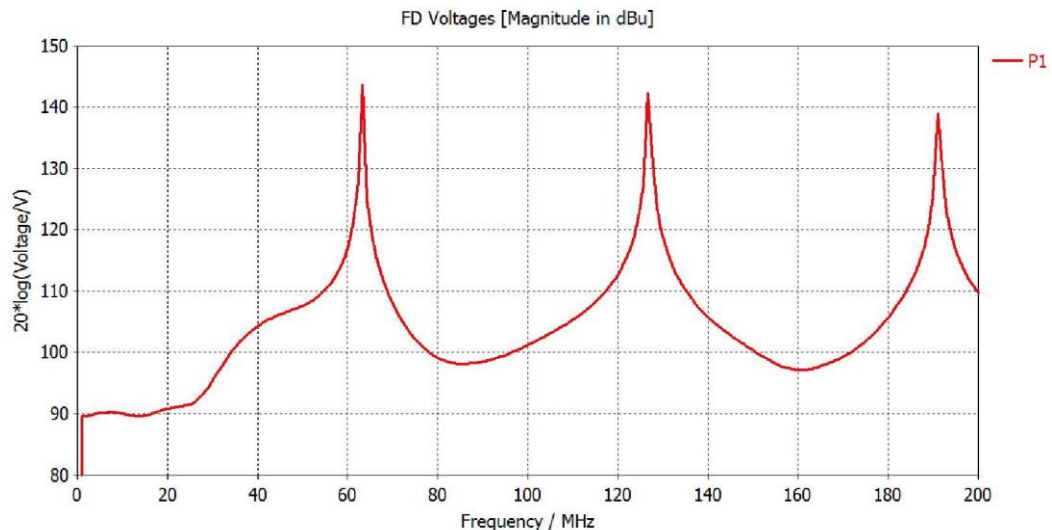


Рис. 2.22. Частотна залежність наведеної напруги для кабелю типу «вита пара».

Модель, показана на рисунку 2.18, дозволяє оцінити рівень наведеної напруги. Характер отриманої частотної залежності (Рисунок 2.22) визначається

довжиною кабелю.

2.4. Лабораторний стенд для демонстрації паразитних електромагнітних зв'язків ближнього поля

Лабораторний стенд складається з двох близько розташованих кабелів і рецептора перешкод. Джерело перешкод підключено до генератора NI PXI-5421. Кабель - рецептор навантажений на змінний резистор 500 Ом. Змінний резистор служить для зміни величини навантаження. Перший канал осцилографа NI PXI-5122 підключений до кабелю - джерела перешкод, другий до кабелю - рецептора. Симетричний пристрій служить для підключення симетричного навантаження до несиметричного входу генератора.

Схема установки для проведення лабораторної роботи представлена на рисунку 2.23.

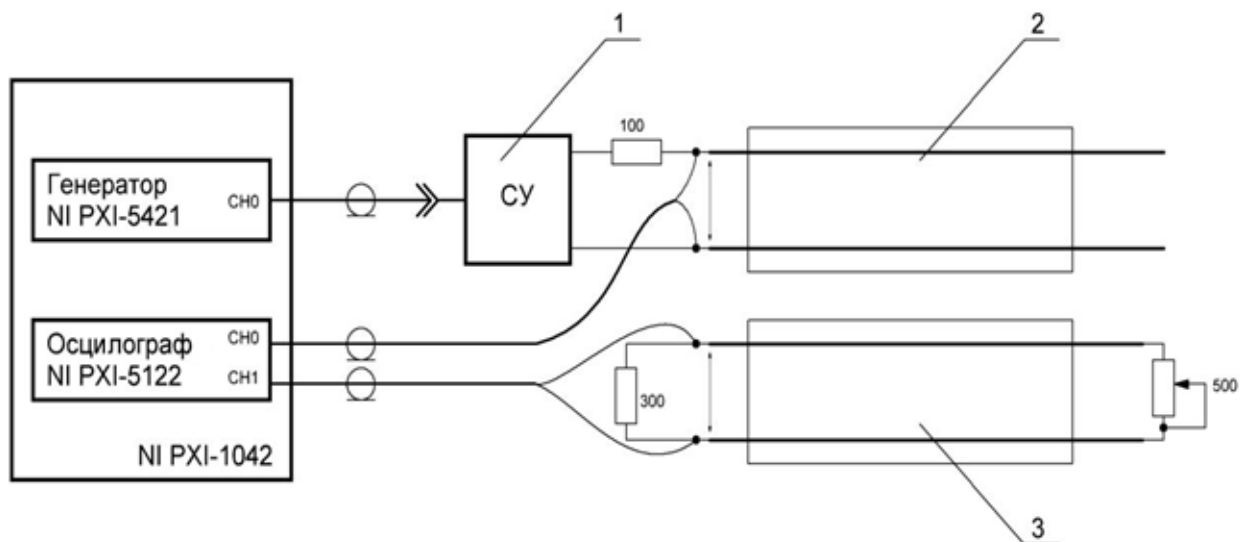


Рис. 2.23. Схема вимірювань коефіцієнта передачі між кабелями:

1 - симетричний пристрій; 2 - кабель - джерело перешкод; 3 - кабель - рецептор перешкод .



Рис. 2.24. Зовнішній вигляд кабелю - джерела і кабелю - рецептора перешкод.

2.5. Модель стенда для демонстрації паразитних електромагнітних зв'язків ближнього поля

На рисунках 2.25 і 2.26 показані об'ємна модель і модель в Schematic для дослідження паразитних зв'язків. Модель складається з кабелю - джерела і кабелю - рецептора перешкод.

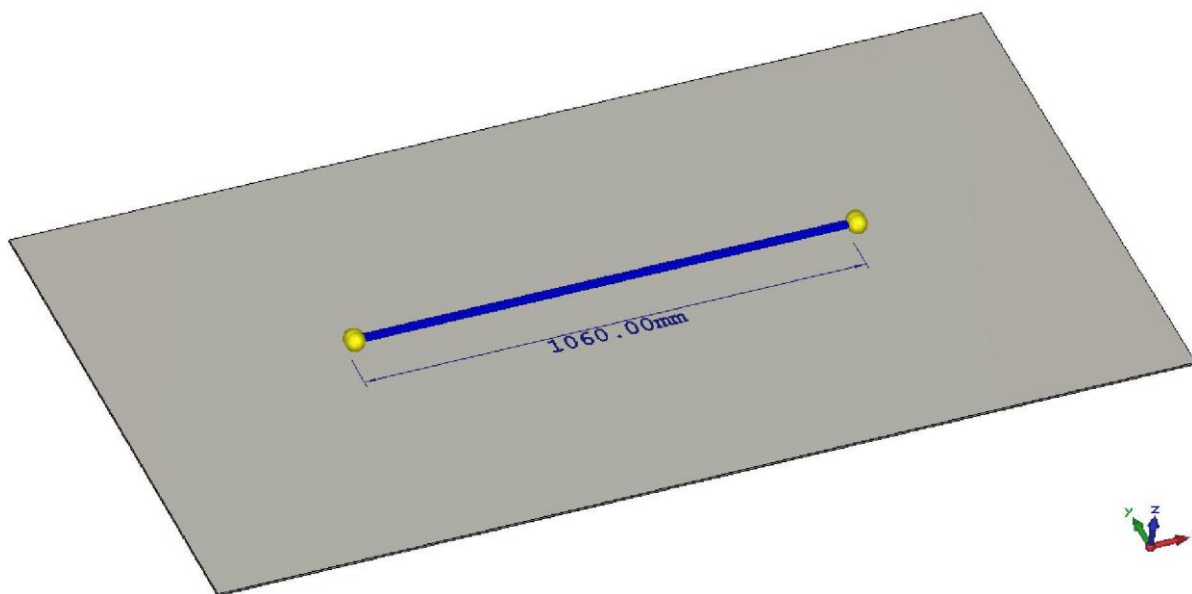


Рис. 2.25. Об'ємна модель для дослідження паразитних зв'язків.

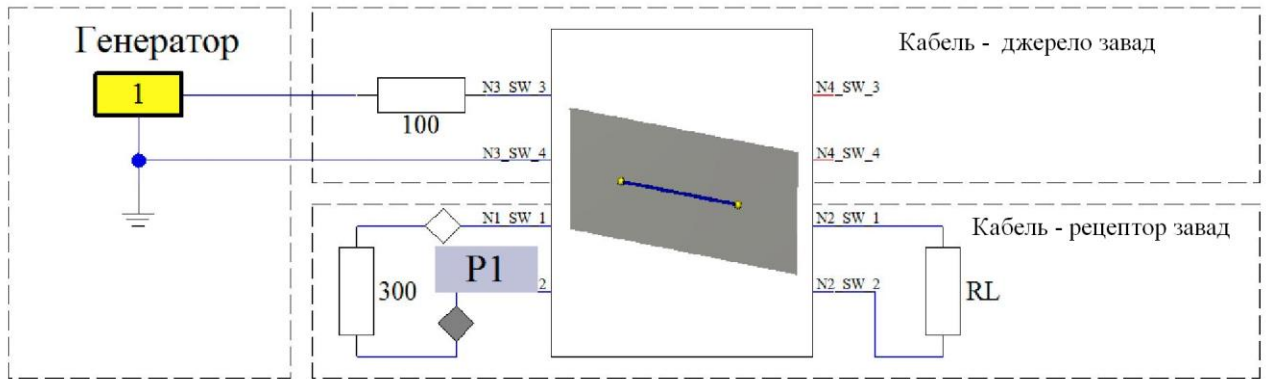


Рис. 2.26. Модель в Schematic.

На кабель - джерело подається змінна напруга від генератора з амплітудою 5 Вольт. Для отримання потрібних залежностей на схему моделі у вбудованій програмі Schematic встановлюються датчики

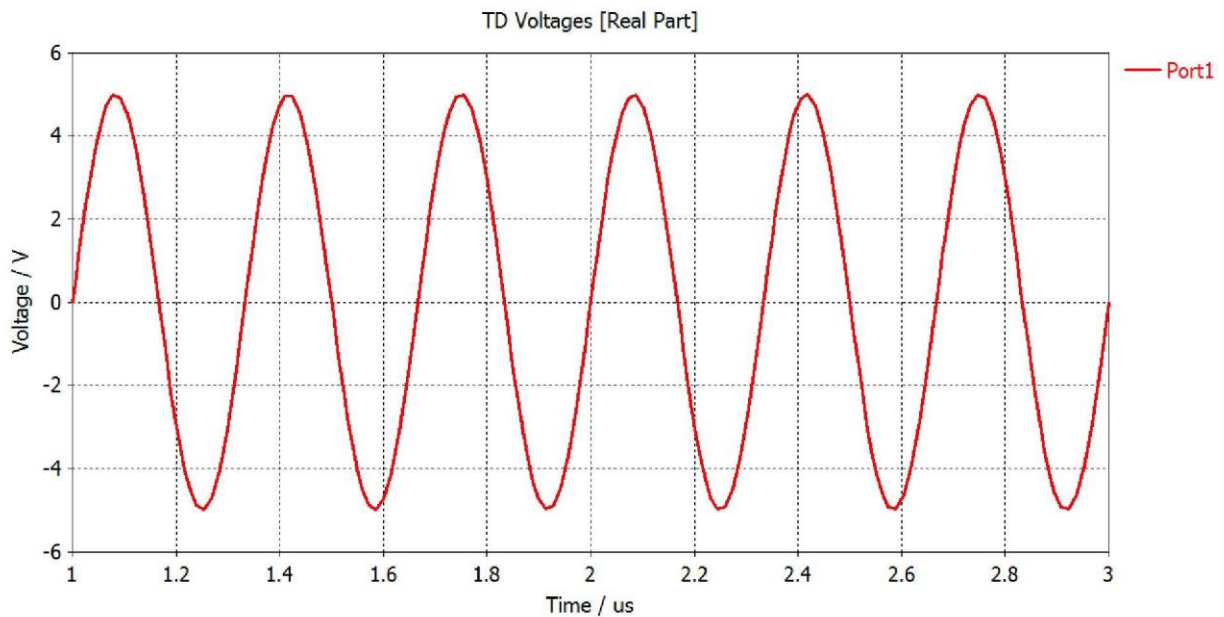


Рис. 2.27. Форма сигналу з генератора.

На рисунку 2.28 наведені осцилограми напруг на кабелі рецепторі при мінімальному значенні опору навантаження.

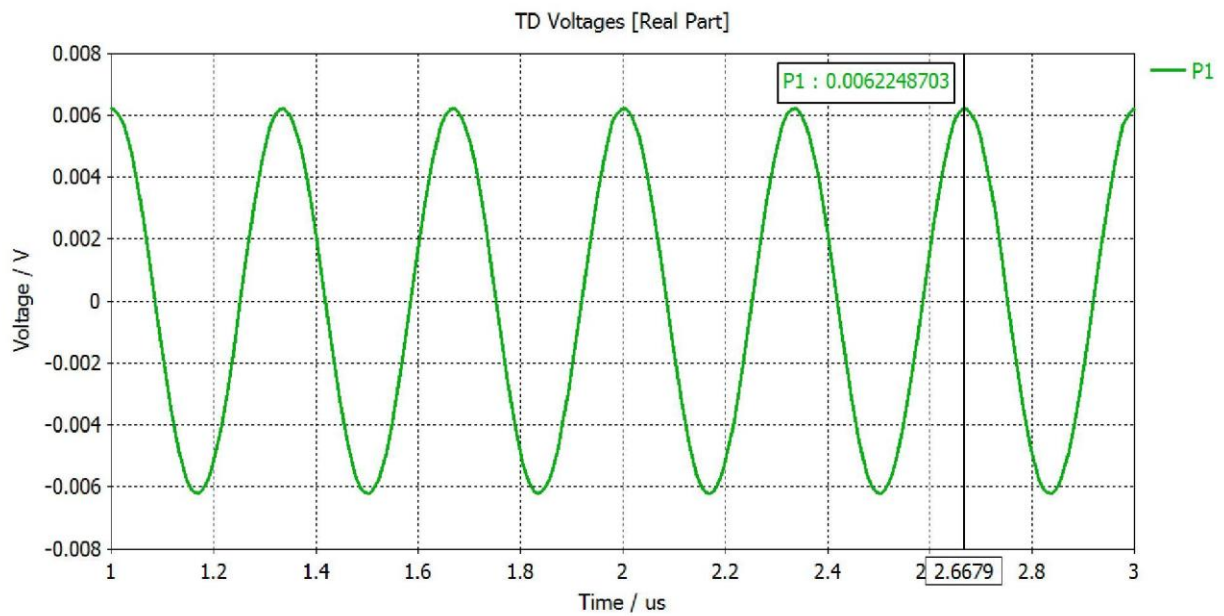


Рис. 2.28. Осцилограма напруги на кабелі - рецепторі при мінімальному значенні опору навантаження.

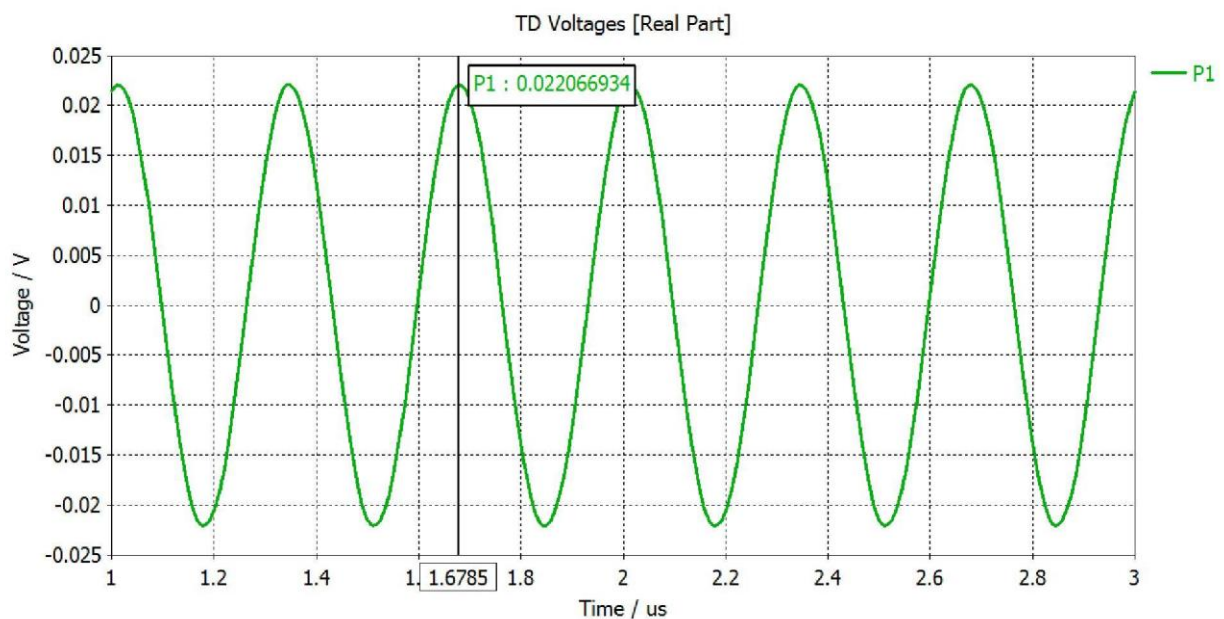


Рис. 2.29. Осцилограма напруги на кабелі - рецепторі при максимальному значенні опору навантаження.

У таблиці 2.1 наведені значення амплітуди наведеного на кабеле - рецепторі напруги при різних значеннях відстані між кабелями. За наведеними результатами можна зробити висновок, що при збільшенні відстані між кабелями паразитних ємнісний зв'язок зменшується.

Залежність амплітуди напруги від відстані

Відстань між кабелем-джерелом та кабелем-рецептором, мм	Амплітуда напруженості на кабелі-рецепторі, мВ
8	22,067
10	14,286
15	5,428
20	2,353

На рисунках 2.30 і 2.31 показані експериментальні осцилограми напруги на кабелі - рецепторі при мінімальному і максимальному опорі навантаження відповідно.

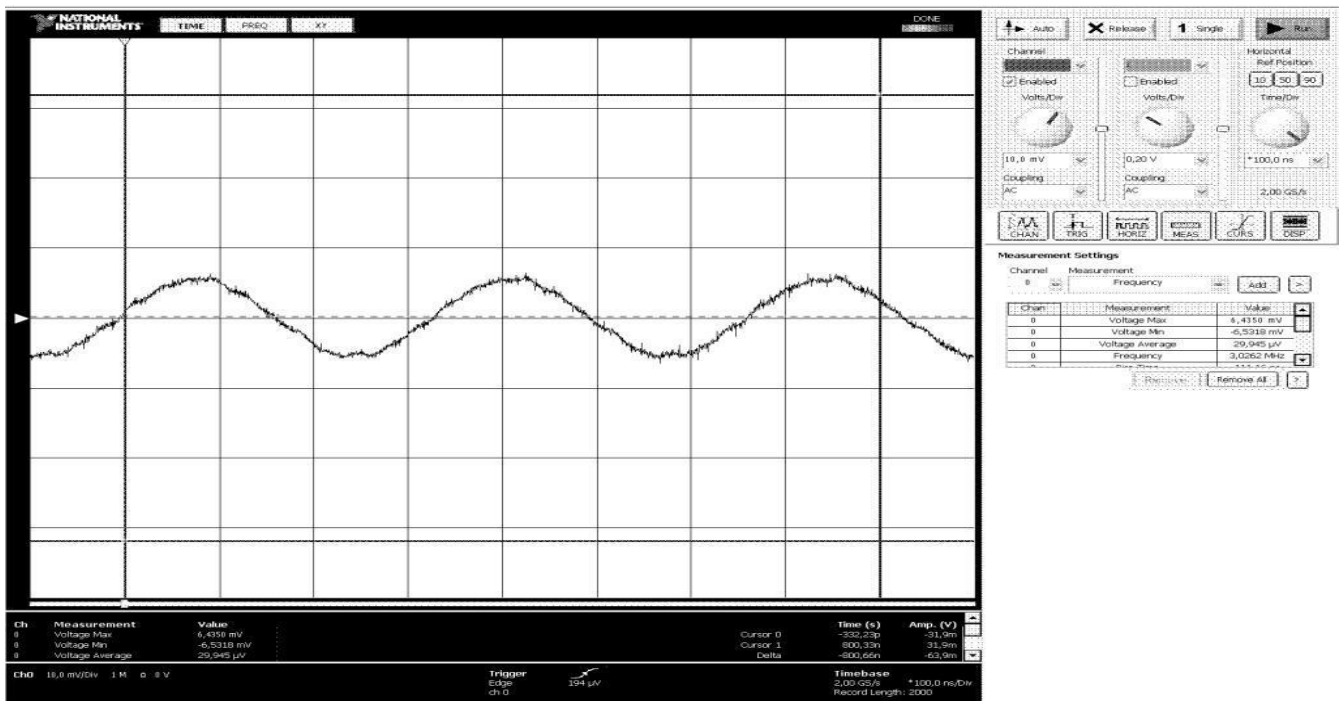


Рис. 2.30. Осцилограма напруги на кабелі-рецепторі при мінімальному опорі навантаження.

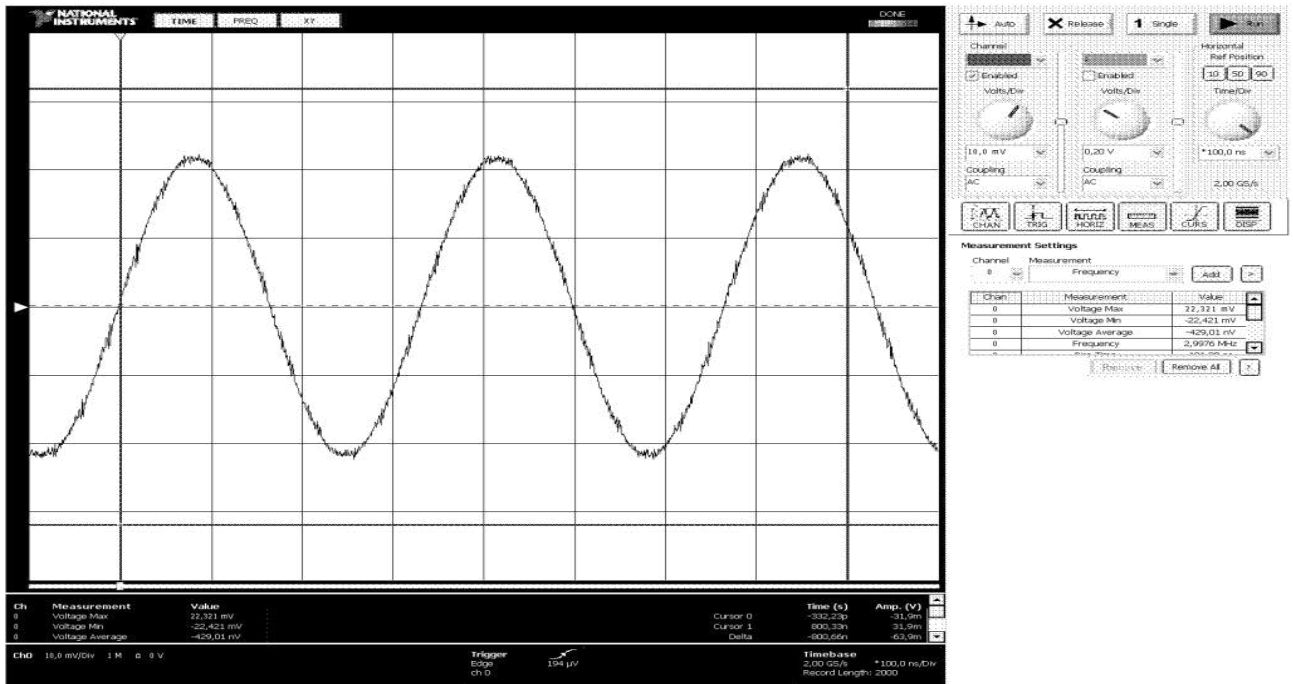


Рис. 2.31. Осцилограма напруги на кабелі-рецепторі при максимальному опорі навантаження.

У таблиці 2.2 наведені експериментальні значення і значення, отримані в результаті моделювання.

Таблиця 2.2

Порівняння результатів експерименту і моделювання

Параметр	Результати моделювання	Експериментальні результати
Амплітуда напруженості на кабелі-рецепторі при мінімальному опорі, мВ	6,225	6,435
Амплітуда напруженості на кабелі-рецепторі при максимальному опорі, мВ	22,067	22,321

2.6. Висновки до розділу 2

У розділі розглянуто механізм паразитних зв'язків у кабельних мережах, наведено схеми та розрахунки таких зв'язків. В модулі CST CS змодельовано електромагнітні ефекти в різних точках кабеля. Також, описано лабораторний стенд для демонстрації паразитних електромагнітних зв'язків ближнього поля.

РОЗДІ 3

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1. Моделювання параметрів ЕМС імпульсних джерел живлення

Джерела вторинного електроживлення - це важлива частина будь-якого радіоелектронного пристрою. У порівнянні з лінійними, імпульсні джерела живлення мають ряд переваг:

- а) високий ККД;
- б) мала вага конструкції;
- в) компактні габаритні розміри;
- г) велика потужність;
- д) широкий діапазон напруг живлення; е) низька ціна.

В імпульсних джерелах в ролі регулюючого елемента виступає ключ, який має два стани: замкнутий і розімкнуте. Регулювання вихідної напруги здійснюється шляхом комутації ключем джерела постійної енергії до навантаження. При використанні широтно-імпульсної модуляції напруга регулюється зміною тривалості імпульсів при постійному періоді проходження імпульсів [9].

Головним недоліком імпульсних перетворювачів є наявність створюваних електромагнітних завад.

3.2. Модель імпульсного джерела живлення з мультівібратором

На рисунку 3.1 приведена схема найпростішого імпульсного блоку живлення. У ролі транзисторів VT1 і VT1 для мультівібратора використали MJE13003.

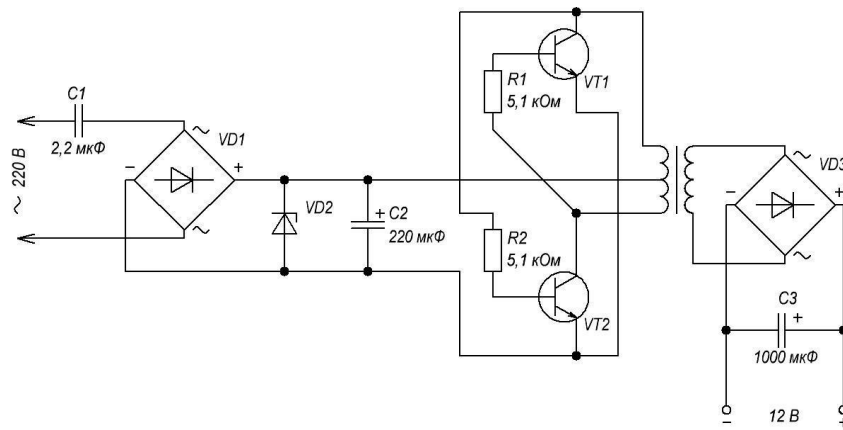


Рис. 3.1. Схема імпульсного джерела живлення.

Конденсатор С1 використовувався з напругою 400 В. Діодні мости VD1, VD2 реалізовані на діодах типу 1N4007. Як стабілітрона VD2 - Д816Г.

В основі імпульсного трансформатора - феритові кільце марки 2000НМ з розмірами К20х10х8. Мережева обмотка містить 220 витків з відводом від середини, провід перетином 0,35 мм. Вторинна обмотка - 35 витків проводом перетином 1 мм [10].

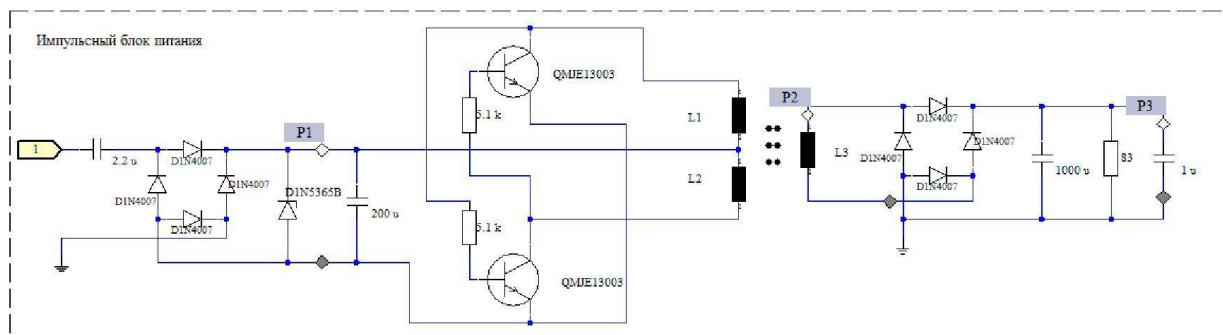


Рис. 3.2. Схема джерела живлення в CST STUDIO SUITE.

Пробники, встановлені на схему, показану на рисунку 3.2, дозволяє отримати форми цікавлючих сигналів. Модель трьохмоткового трансформатора складається з трьох пов'язаних котушок. Всі напівпровідникові елементи схеми описуються за допомогою sрісе-параметрів [11].

На рисунках 3.3, 3.4 і 3.5 приведені осцилограми, отримані в результаті моделювання.

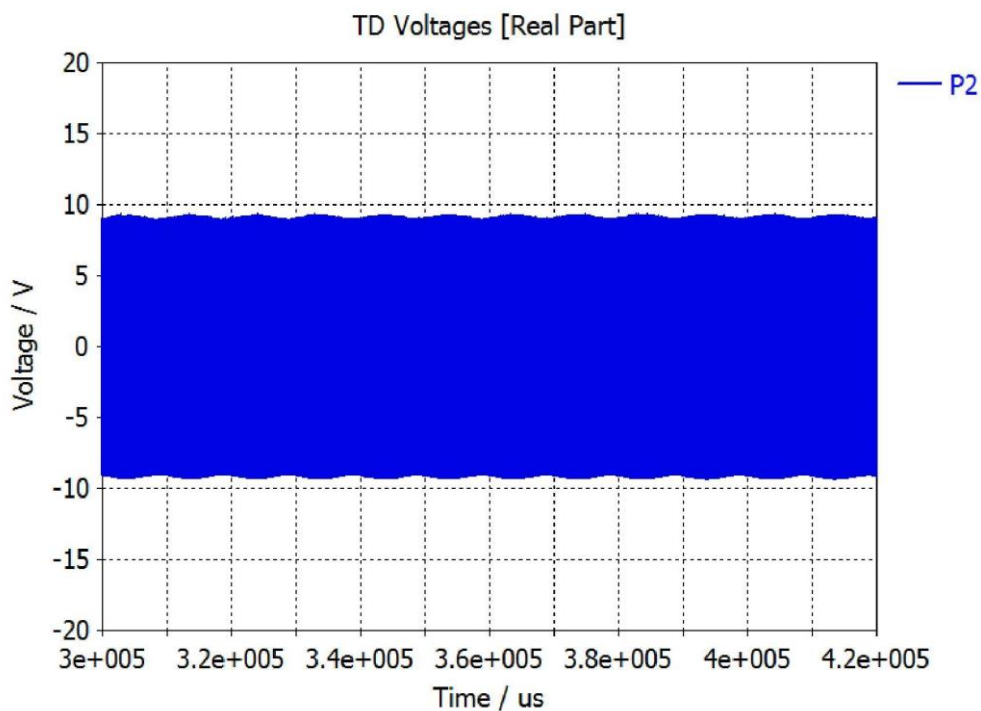


Рис. 3.3. Сигнал імпульсного блоку живлення на II обмотці.

На рисунку 3.3 видно огибающую з частотою 100 Гц, отриману в результаті двохпівперіодного випрямлення напруги.

На рисунку 3.4 приведена форма того ж сигналу, але при меншій часовій розгортці. Період повторення імпульсів становить 135 мкс.

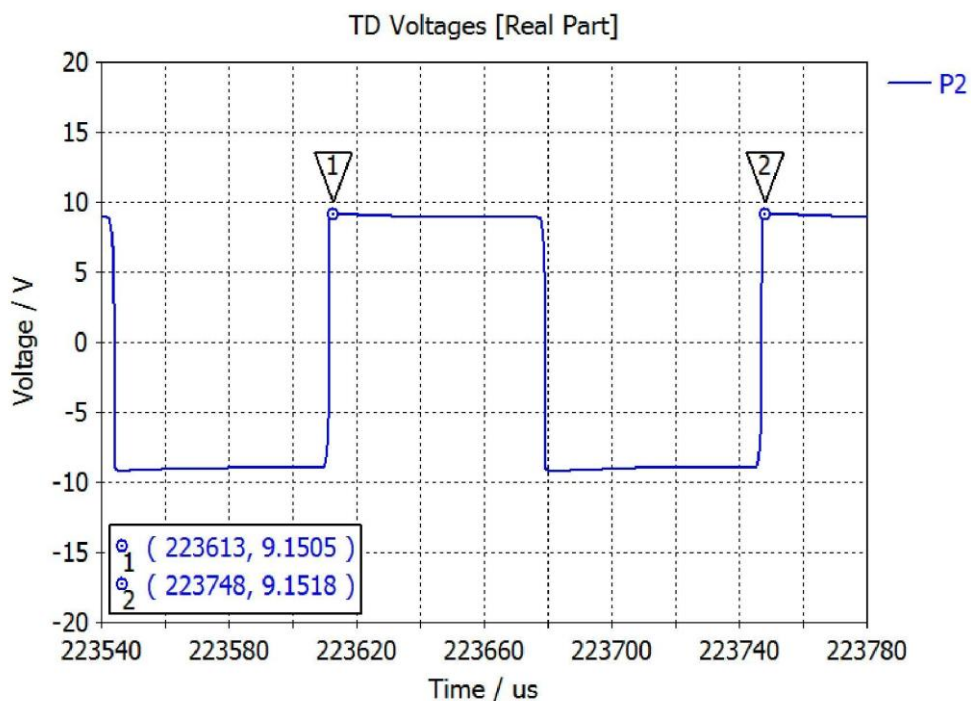


Рис. 3.4. Сигнал імпульсного блоку живлення на II обмотці

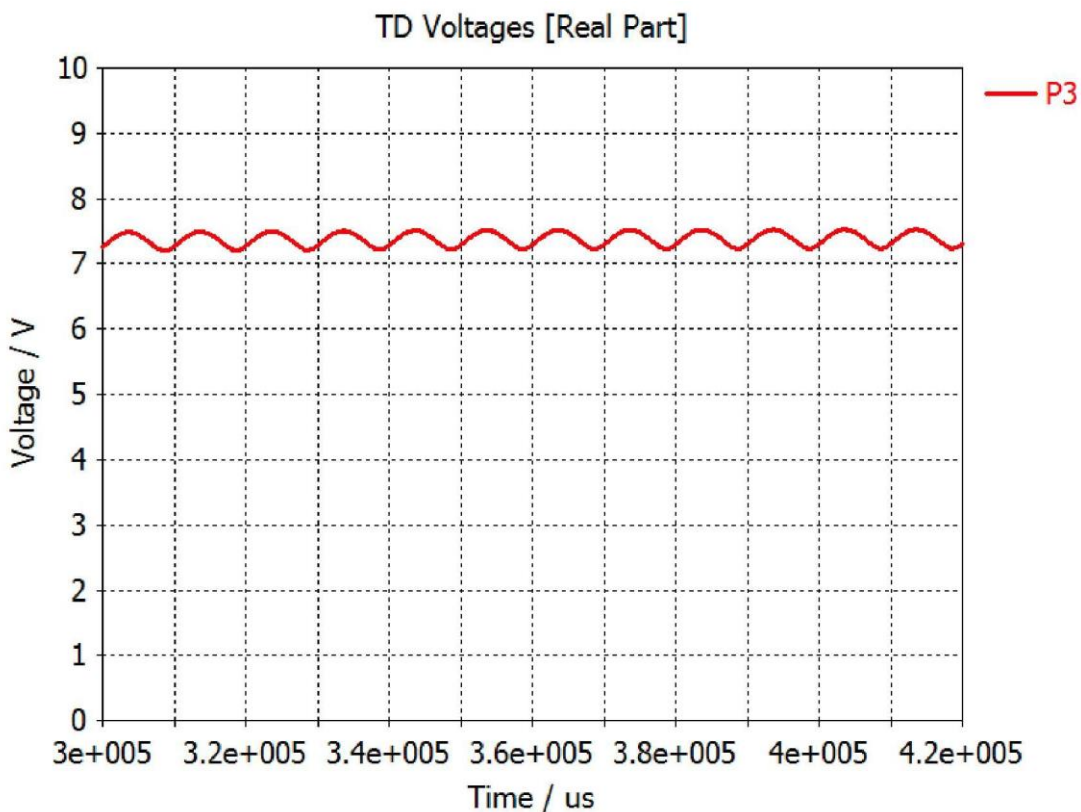


Рис. 3.5. Форма сигналу на навантаженні імпульсного блоку живлення

На малюнках 3.6, 3.7 і 3.8 показані експериментальні осцилограм досліджуваних сигналів

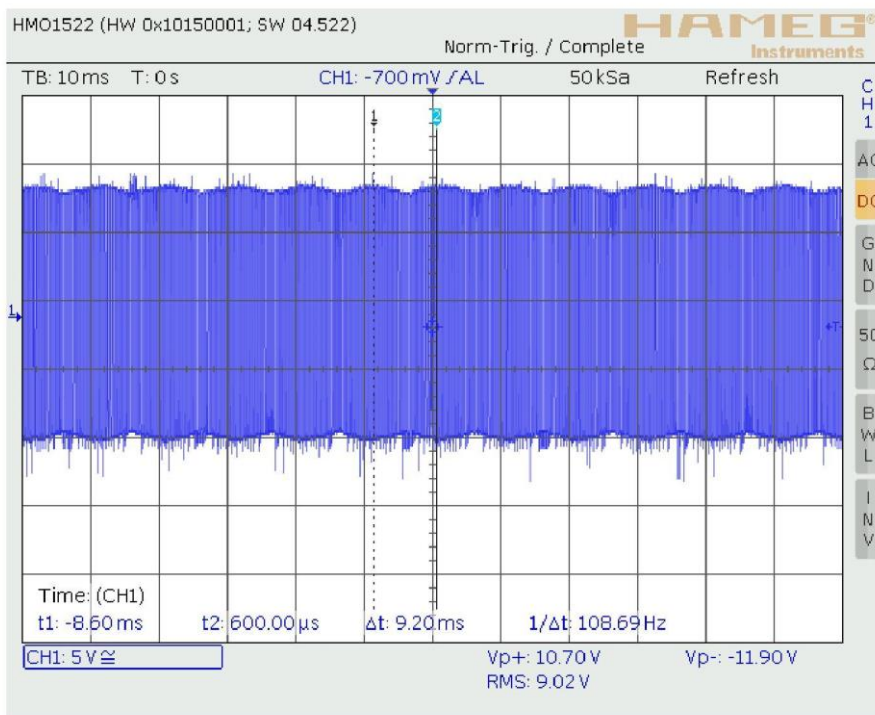


Рис. 3.6. Експериментальна форма сигналу на вторинній обмотці трансформатора імпульсного блоку живлення.

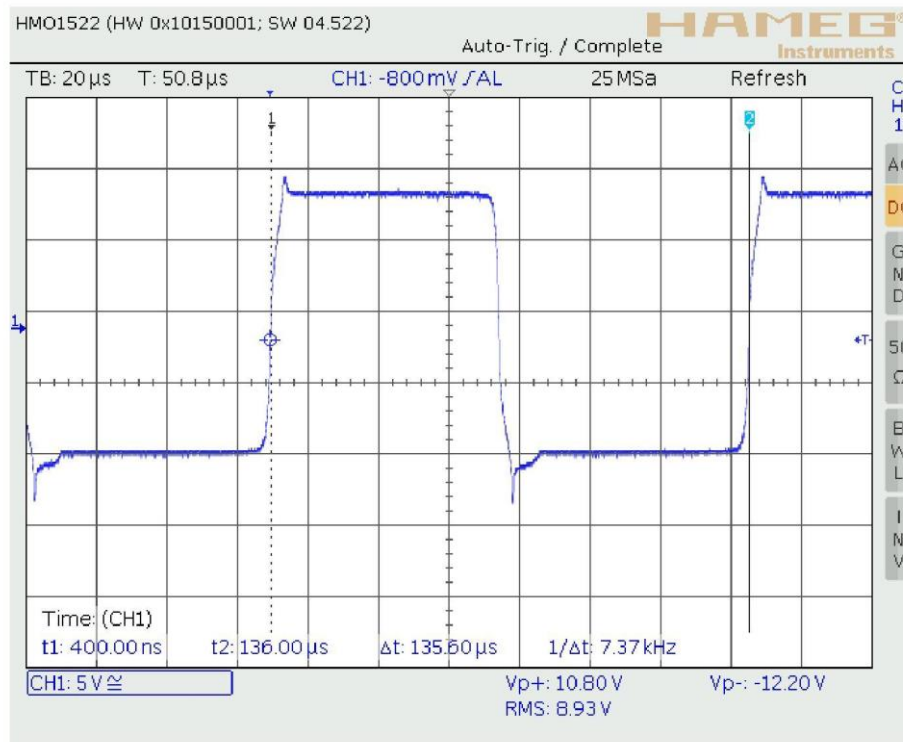


Рис. 3.7. Експериментальна форма сигналу на вторинні обмотці трансформатора імпульсного блоку живлення (збільшений масштаб).

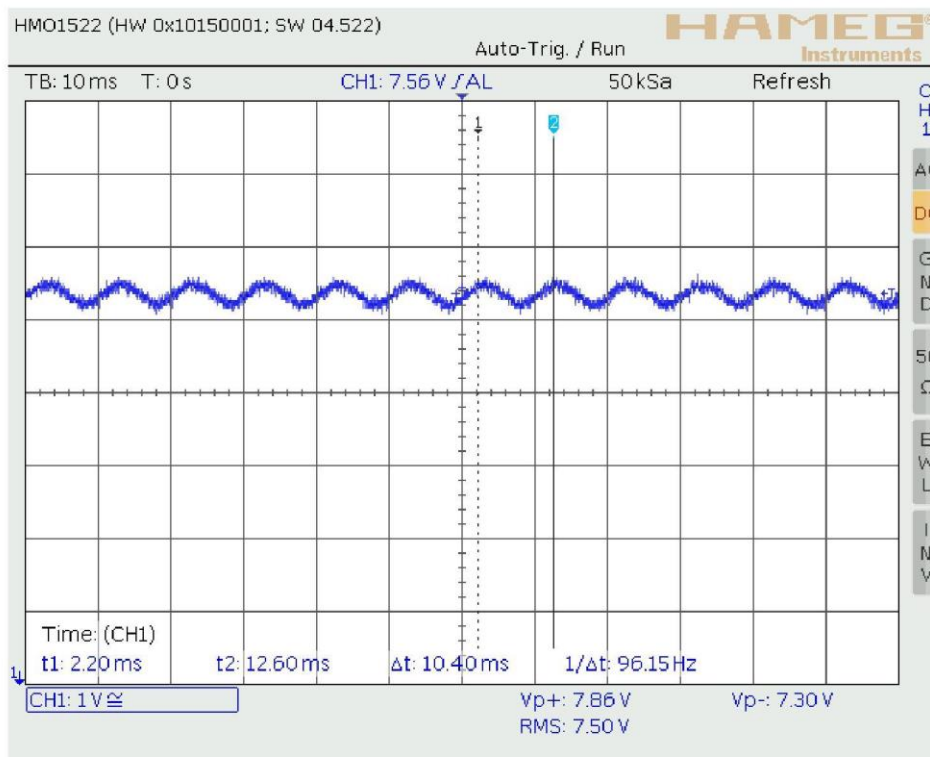


Рис. 3.8. Експериментальна форма сигналу на навантаженні імпульсного блоку живлення.

Для вимірювання кондуктивних перешкод використовувався еквівалент мережі, зібраний у вбудованому модулі Schematic пакета програм CST за даними ГОСТ 30805.16.1.2-2013 [12]. Схема еквівалента мережі показана на рисунку 3.9. Результати моделювання показані на рисунку 3.10.

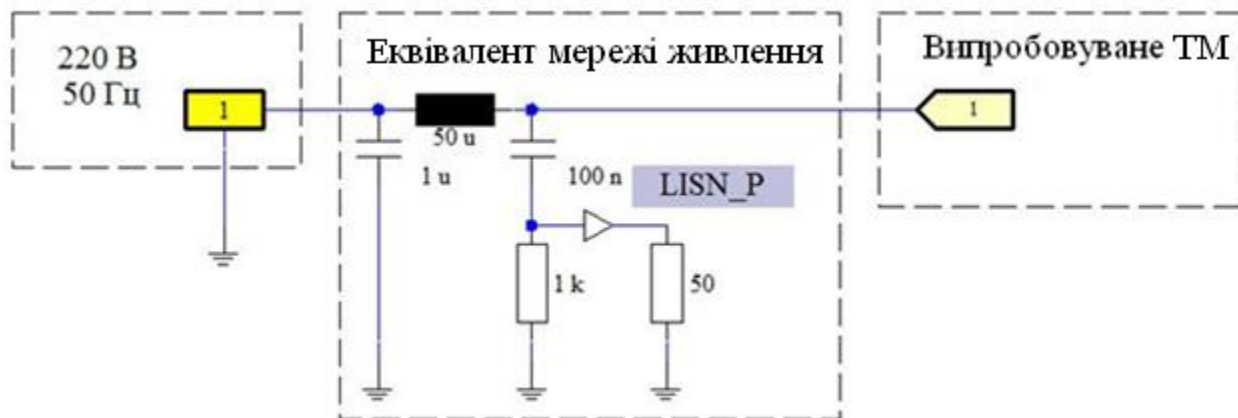


Рис. 3.9.- Схема еквівалента мережі.

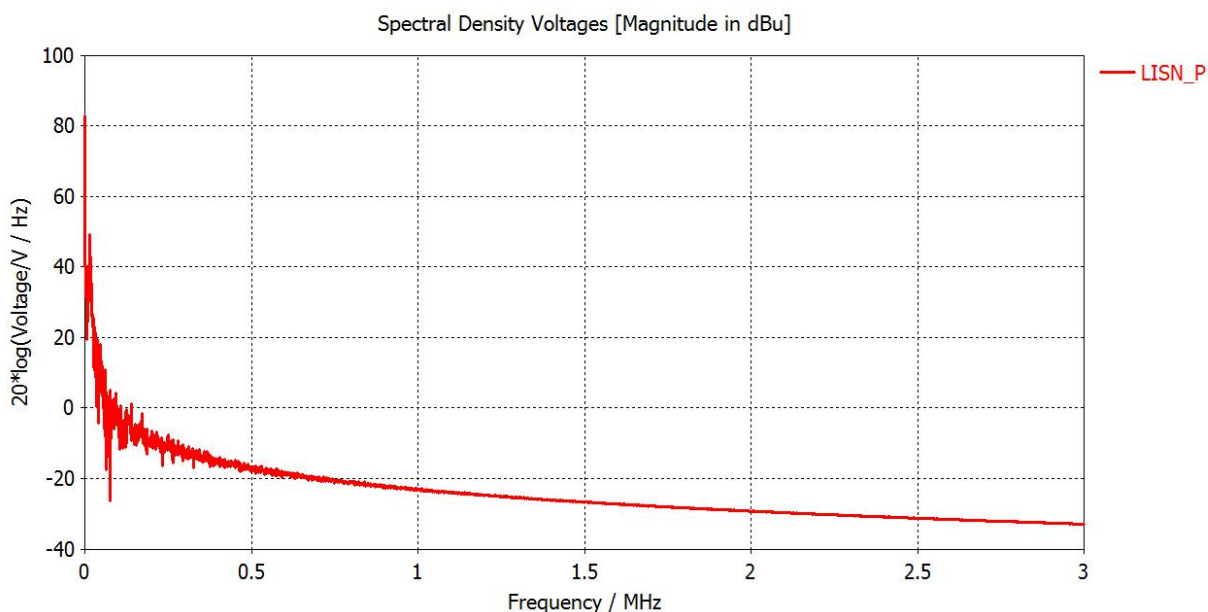


Рис. 3.10. Результати моделювання.

В діапазоні частот від 150 кГц до 3 МГц досліджуваний пристрій зі значним запасом відповідає нормам, встановленим ГОСТ Р51318.11-2006 [13].

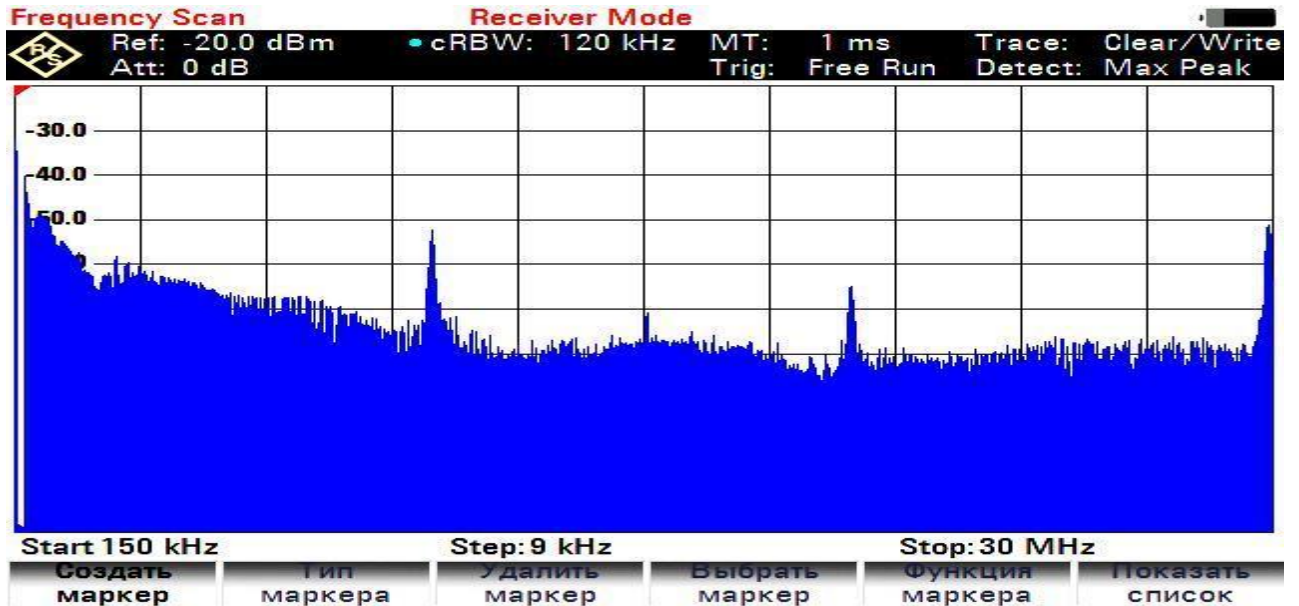


Рис. 3.11. Експериментальні результати вимірювань кондуктивних перешкод.

На рисунку 3.11 наведені результати вимірювань кондуктивних перешкод. Максимуми спостерігаються на частотах 10 МГц, 20 МГц, 30 МГц. Експериментальні результати підтверджують результати моделювання

3.2. Модель імпульсного блоку живлення з широтно-імпульсною модуляцією

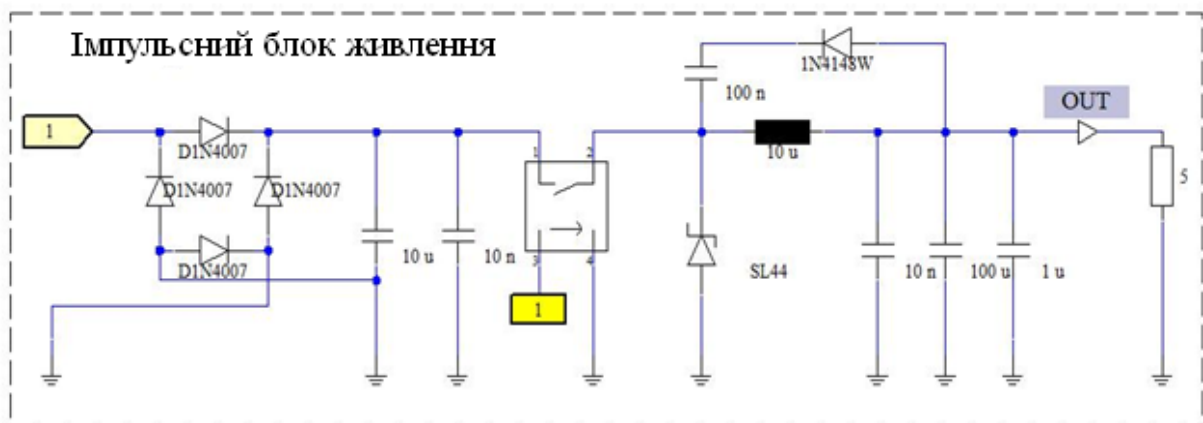


Рис. 3.12. Схема імпульсного джерела живлення з ШІМ (широтно імпульсною модуляцією).

На рисунку 3.12 показана схема типового імпульсного перетворювача з

широкоімпульсною модуляцією (ШІМ). З порту 1 надходить послідовність прямокутних імпульсів з періодом проходження 10 мкс. Цей сигнал управляє роботою комутатора.

Для опису напівпровідникових елементів використовувалися специфічні параметри.

Керування рівнем вихідної напруги здійснюється шляхом через трансформаційних змін скважності сигналу з порту 1 (рисунок 3.13)

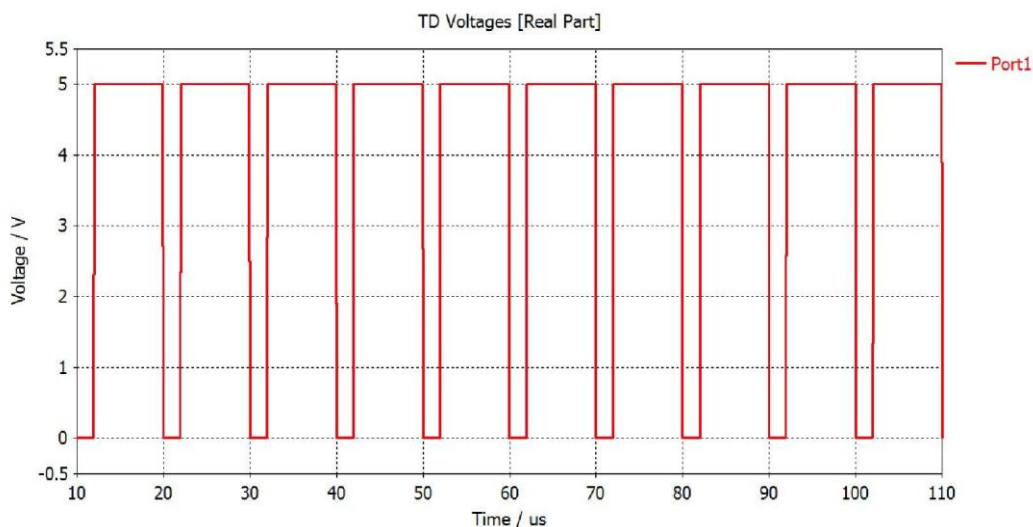


Рис. 3.13. Форма керуючого сигналу з порту 1.

На рисунку 3.14 показані осцилограми вихідного сигналу для коефіцієнта заповнення 0,2, 0,5 і 0,8 керуючого сигналу. При збільшенні коефіцієнта заповнення спостерігається збільшення вихідного напруги.

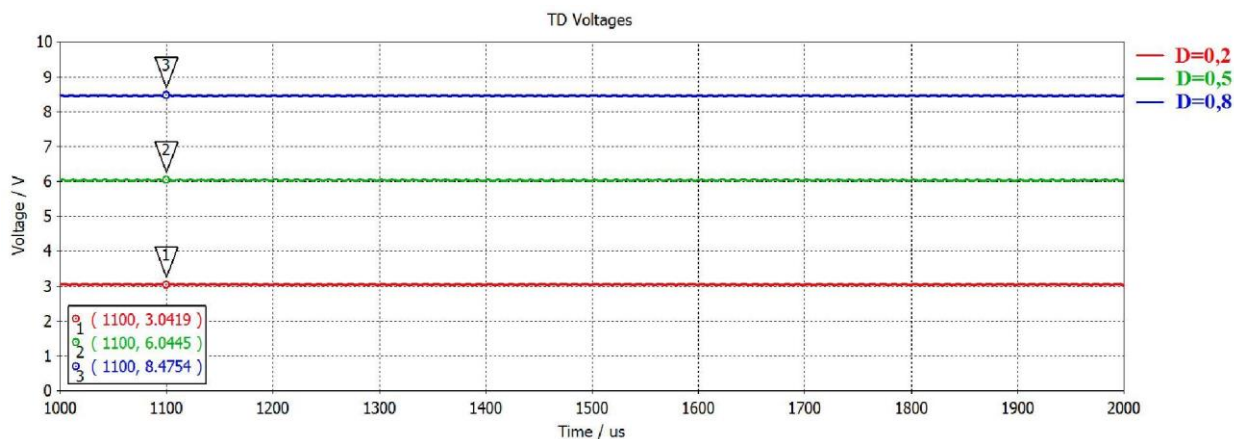


Рис. 3.14. Осцилограми вихідної напруги.

Вимірювання рівня створюваних кондуктивних перешкод проводилося за допомогою еквівалента мережі з встановленим пробником LISN_P (рисунок 3.9). Результати моделювання наведені на рисунку 3.15. Вимірювання про-переводила при коефіцієнті заповнення 0,8 керуючого сигналу.

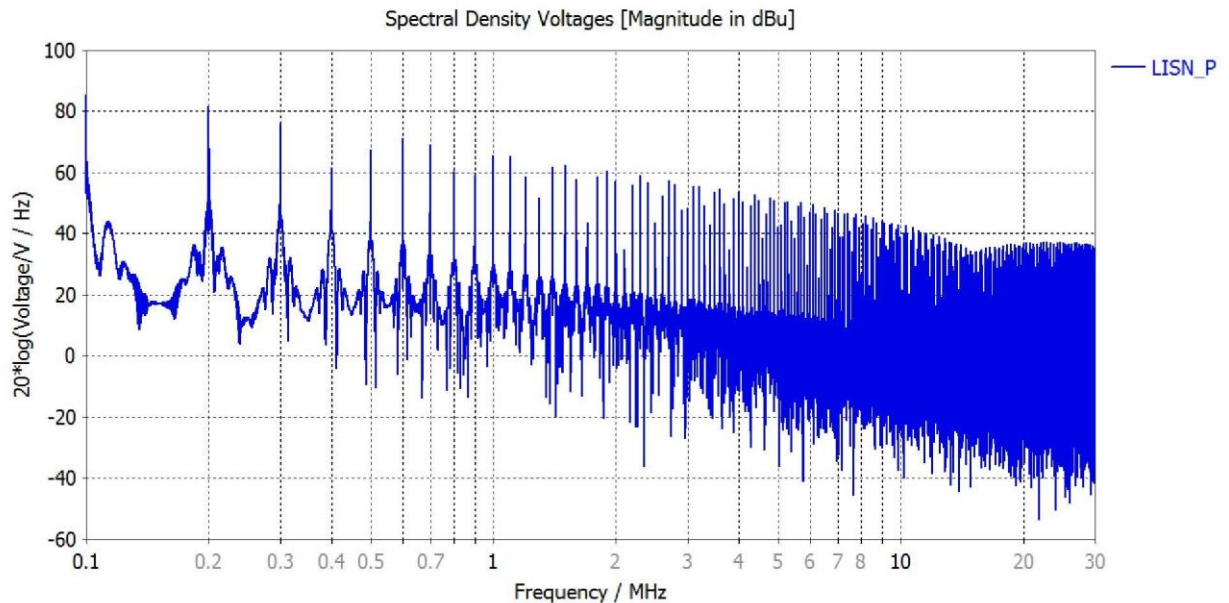


Рис. 3.15. Результати моделювання.

Результати моделювання свідчать про перевищення пристроєм допустимих норм, що є типовою проблемою імпульсних джерел живлення.

На рисунку 3.16 показана схема імпульсного перетворювача з установленням на вході конденсатором. Результати вимірювань кондуктивних перешкод показані на рисунку 3.17.

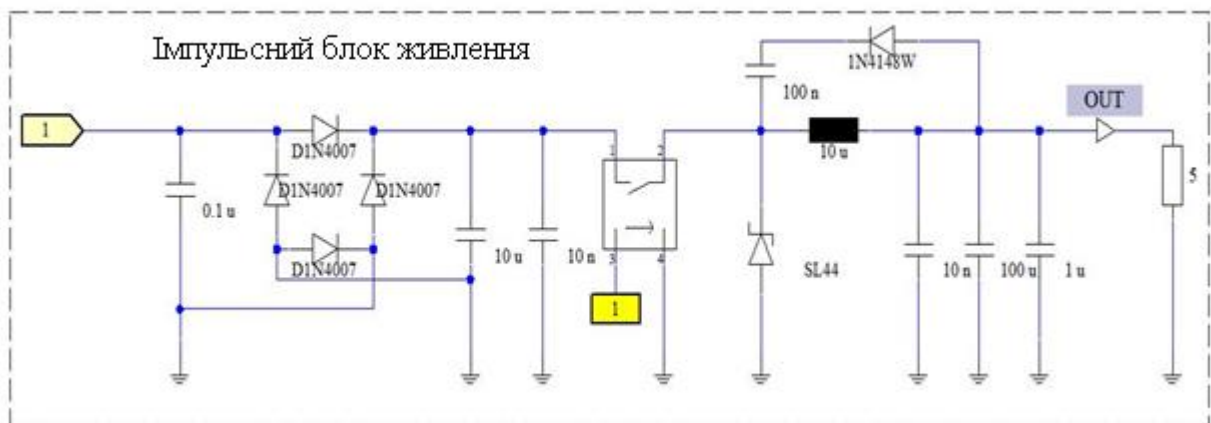


Рис. 3.16. Схема імпульсного джерела живлення з встановленим на вході конденсатором.

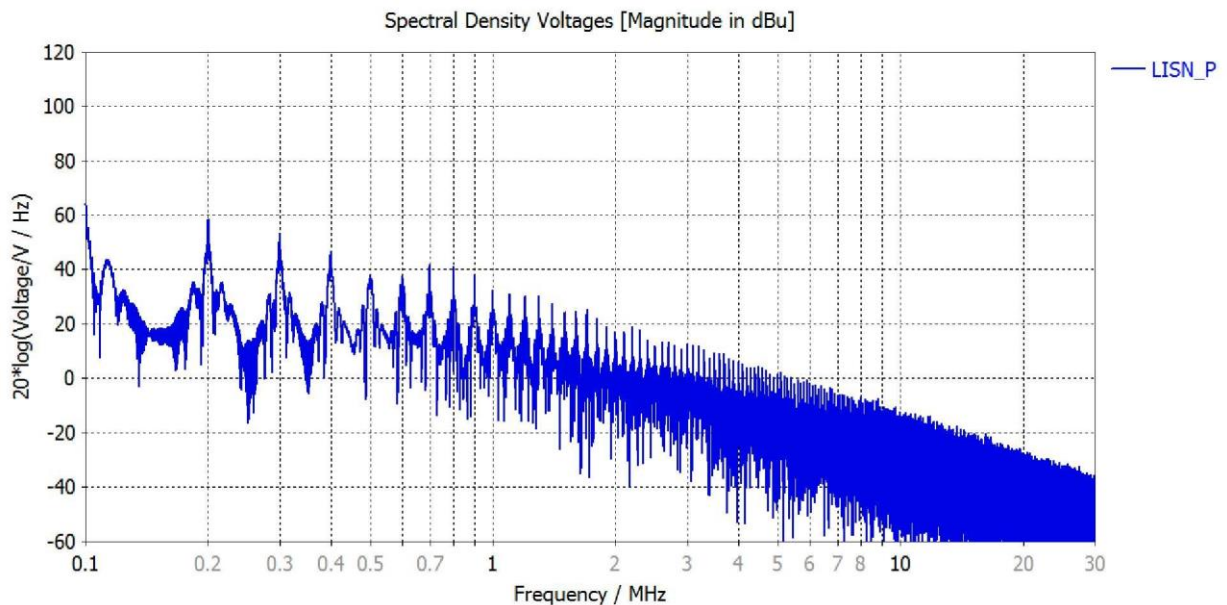


Рис. 3.17. Результати моделювання при встановленому конденсаторі на вході джерела живлення.

Основною причиною виникнення перешкод у імпульсних джерелах з ШІМ є використання в даному типі джерел прямокутних імпульсів з короткими фронтами, що визначає наявність великого числа високочастотних спектральних складових і вимагає застосування завадоподавляючих фільтрів.

Установка конденсатора на вхід імпульсного джерела живлення дала можливість значно зменшити рівень створюваних перешкод.

3.3. Стенд для демонстрації емісії ІРП на основі генератора тактової частоти

Пристрій, показаний на рисунку 4.1, являє собою стенд для демонстрації емісії випромінюються індустриальних радіоперешкод на основі генератора тактової частоти. Воно служить для ілюстрації важливості приділенням уваги живленням ЕС при проектуванні друкованих плат .

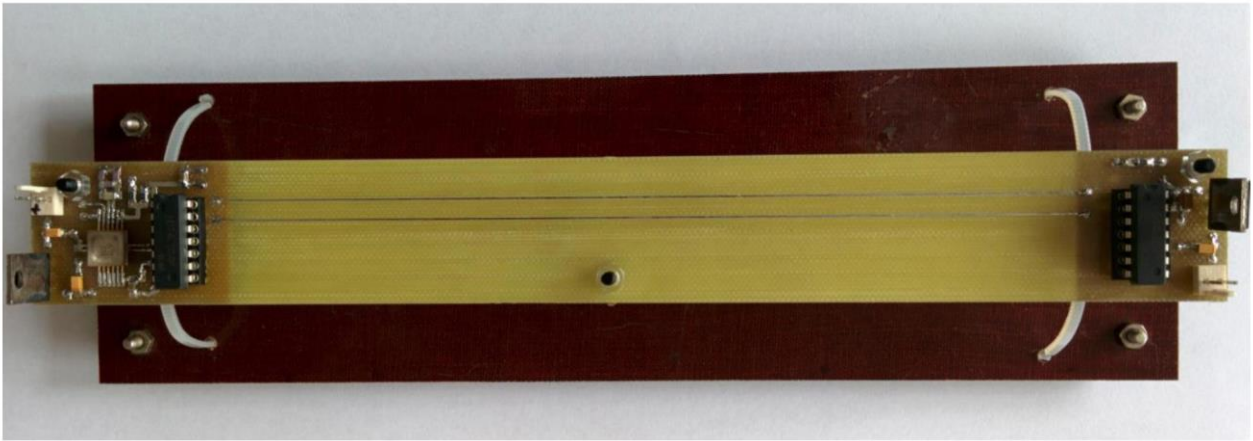


Рис. 4.18. Зовнішній вигляд стенда для демонстрації емісії випромінюються індустриальних радіоперешкод.

Структурна схема пристрою показана на рисунку 3.19.

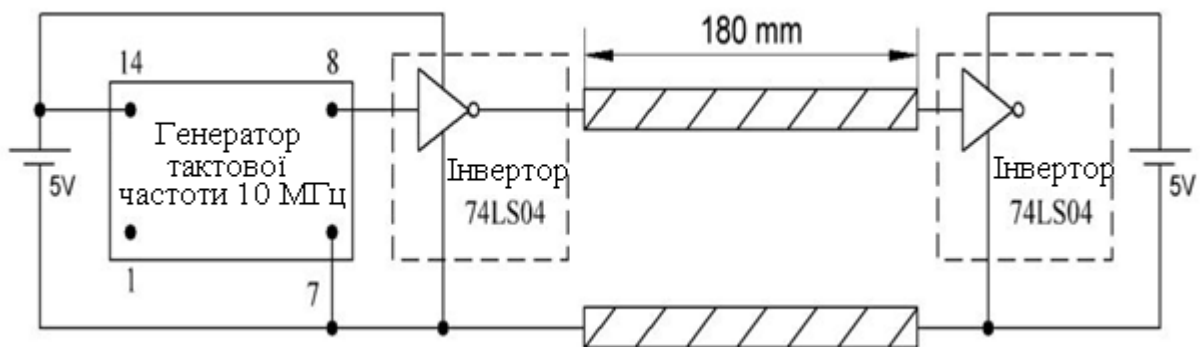


Рис. 3.19. Структурна схема стенду для демонстрації емісії випромінюваних індустриальних радіоперешкод

Формуються генератором тактової частоти прямокутні імпульси надходять на інвертор, з виходу інвертора сигнал, пройшовши відрізки лінії довжиною 180 мм, надходить на інвертор з іншого боку пристрою (рисунок 3.19).

Розміщення елементів на платі пристрою показано на рисунку 3.20. Для обмеження напруги живлення до рівня 5 В використовується обмежувач позитивного напруги типу 7805С.

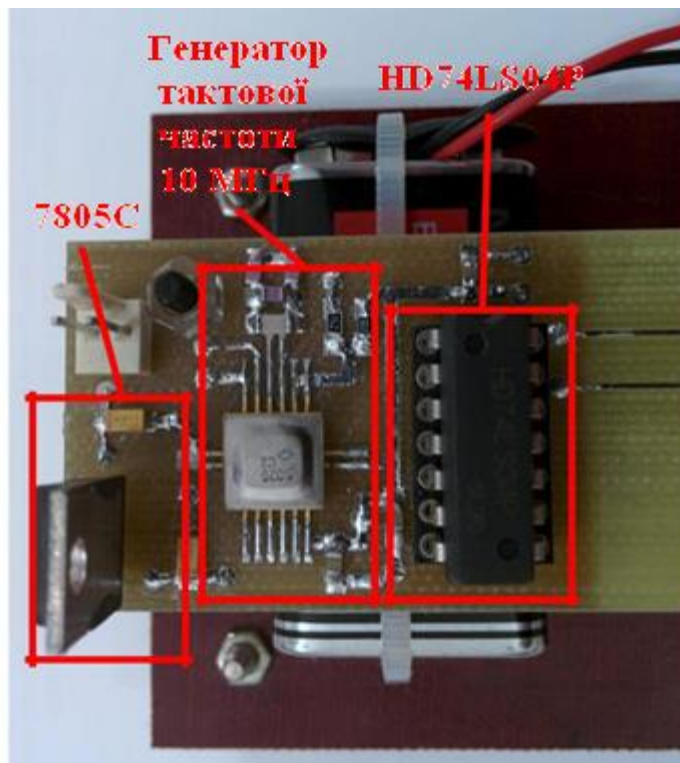


Рис. 3.20. Розміщення елементів на платі пристрою.

На виході інвертора (рисунок 3.20) формується сигнал, наведений на рисунку 3.21. Період проходження імпульсів становить 100 нс. Виміряна на виході інвертора форма сигналу показана на рисунку 3.21.

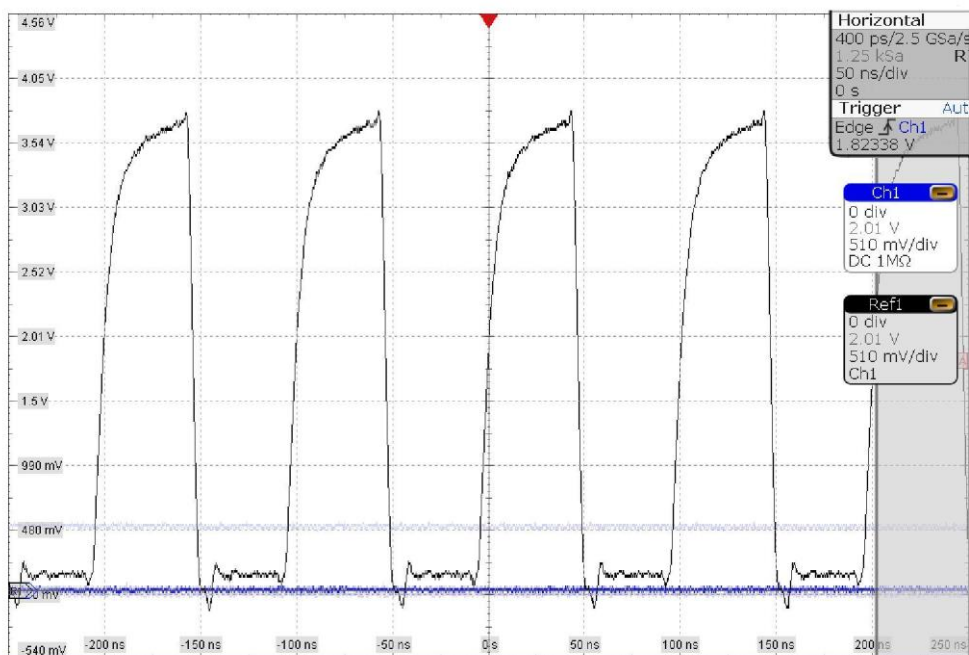


Рис. 3.21. Експериментальна форма сигналу на виході інвертора.

3.4. Модель стенда для демонстрації емісії ІПП на основі генератора тактової частоти.

Модель пристрою в CST STUDIO SUITE складається з двох частин: тривимірна модель в модулі CST MICROWAVE STUDIO і модель в Schematic, показані на малюнках 3.22 і 3.23 відповідно.

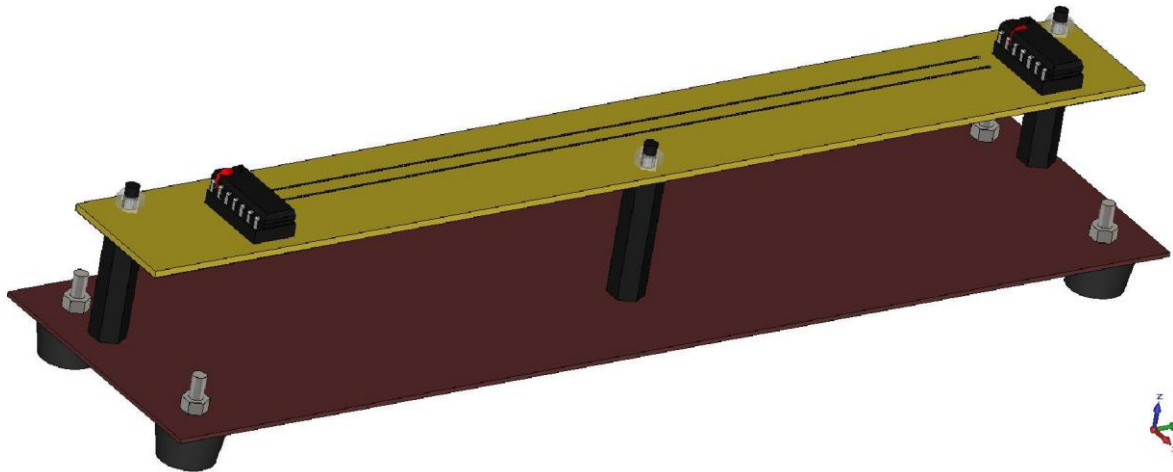


Рис. 3.22. Зовнішній вигляд тривимірної моделі пристрою.

Для моделювання мікросхем у вбудованій програмі Schematic використали spice і IBIS параметри.

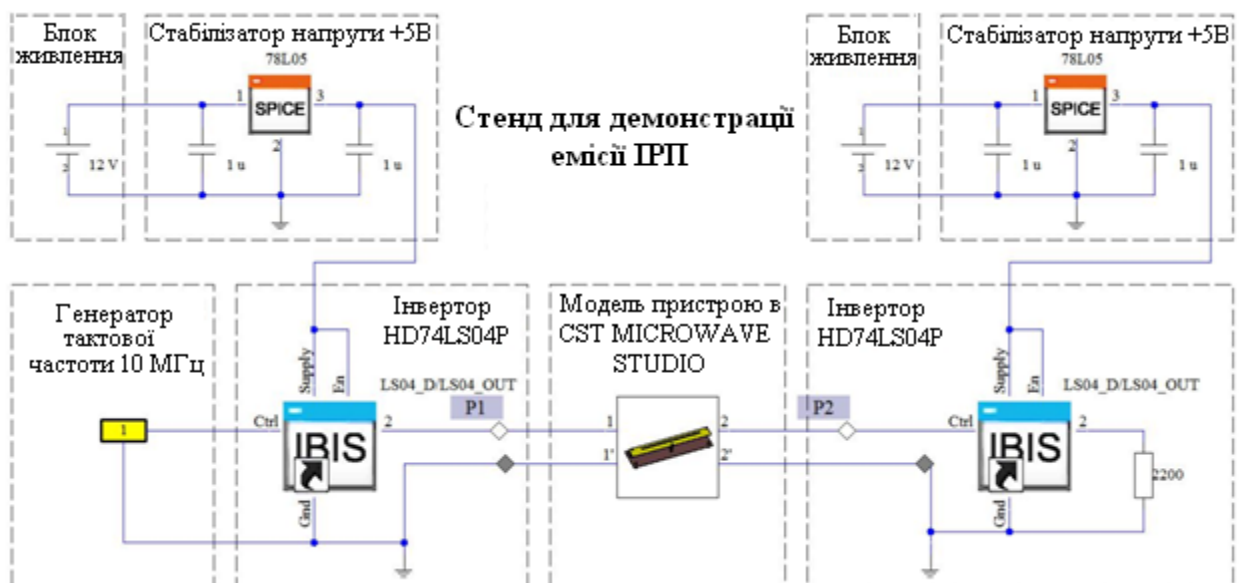


Рис. 3.23. Модель пристрою в Schematic.

Для отримання потрібних осцилограм на схему встановлені пробники.

На рисунку 3.24 приведена осцилограма сигналу з виходу інвертора.

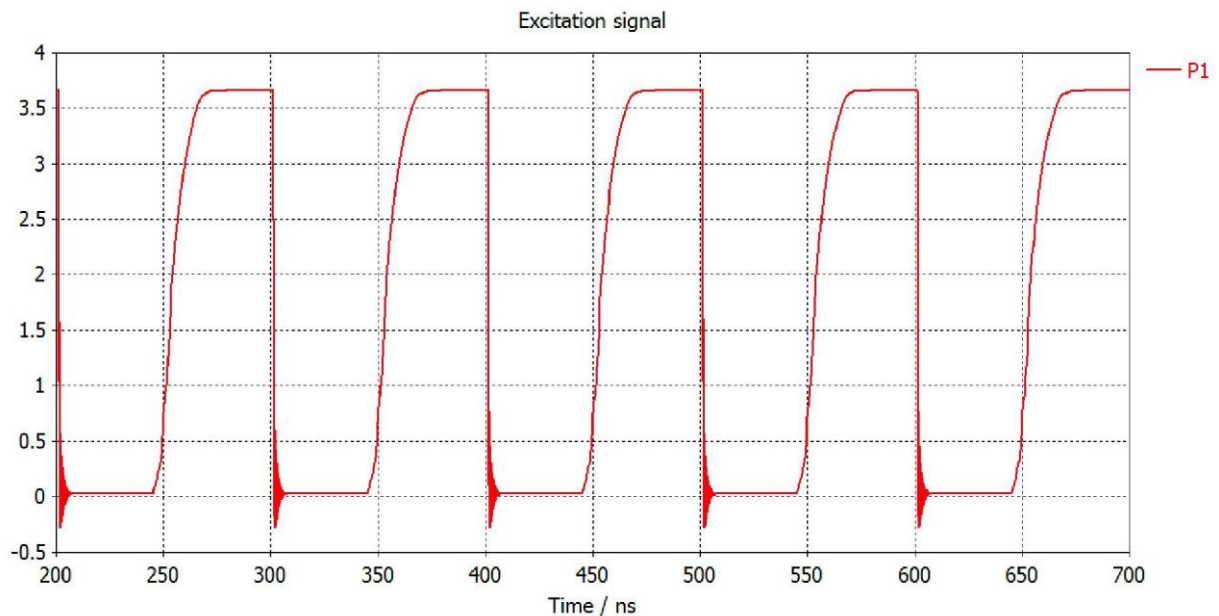


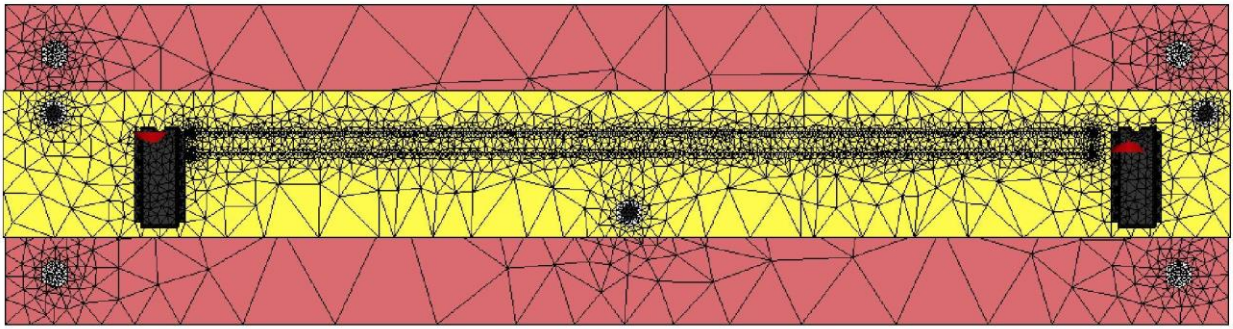
Рис. 3.24. Форма сигналу на виході інвертора.

Аналіз моделі проводився в тимчасовій області за допомогою вбудованого розв'язувача Time Domaine Solver і в частотній з використанням решателя Frequency Domaine Solver.

Для отримання осцилограм результатів вимірювання напруженості поля, створюваного пристроєм, на відстані три метри від пристрою використовуюся аналіз у часовій області, а для отримання графічного зображення зображення картини поля - аналіз в частотній області.

Як збудливого сигналу використовується сигнал, форма якого приведена на рисунку 3.24. Збудливий сигнал був експортований з модуля Schematic в форматі ASCII і імпортовано в CST MICROWAVE STUDIO.

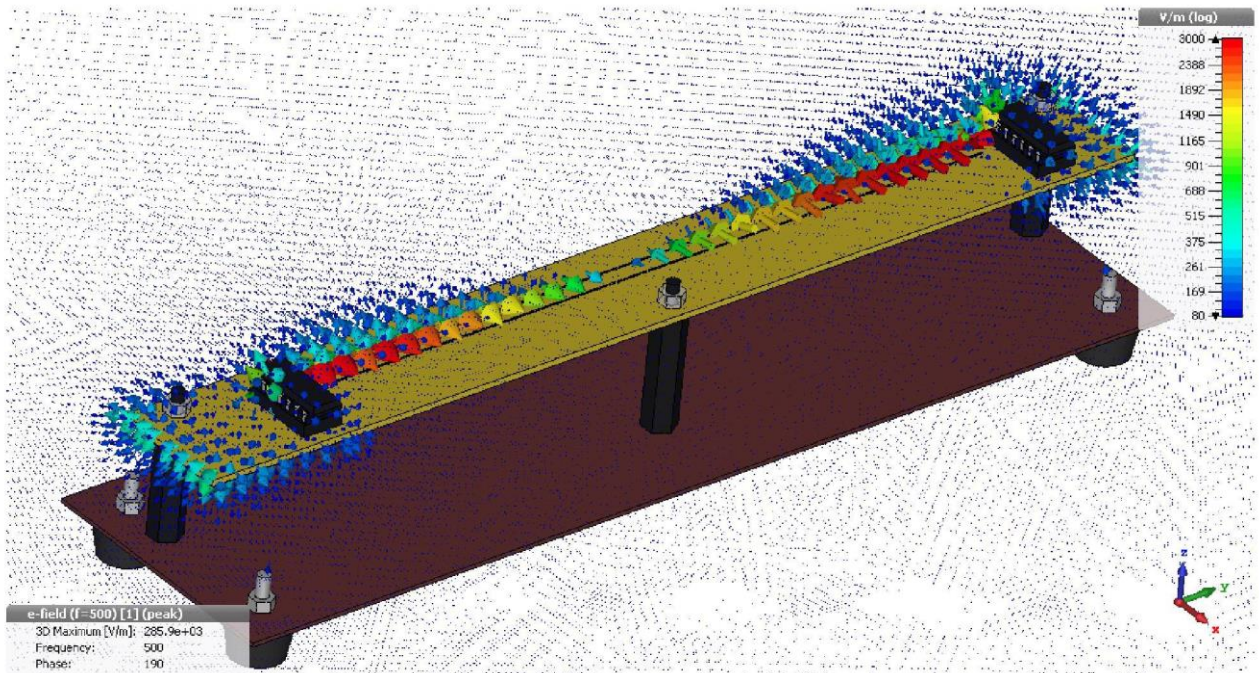
Тетраедральна сітка розбиття моделі, графічне зображення картини поля, розподіл напруженості електричного поля по моделі і розподіл поверхневого струму наведені на малюнках 3.25, 3.26, 3.27 і 3.28 відповідно.



High Frequency Mesh
 Tetrahedrons: 140671
 Symmetries: none



Рис. 3.25. Тетраедральна сітка розбиття моделі.



Рису. 3.26. Графічне зображення картини поля

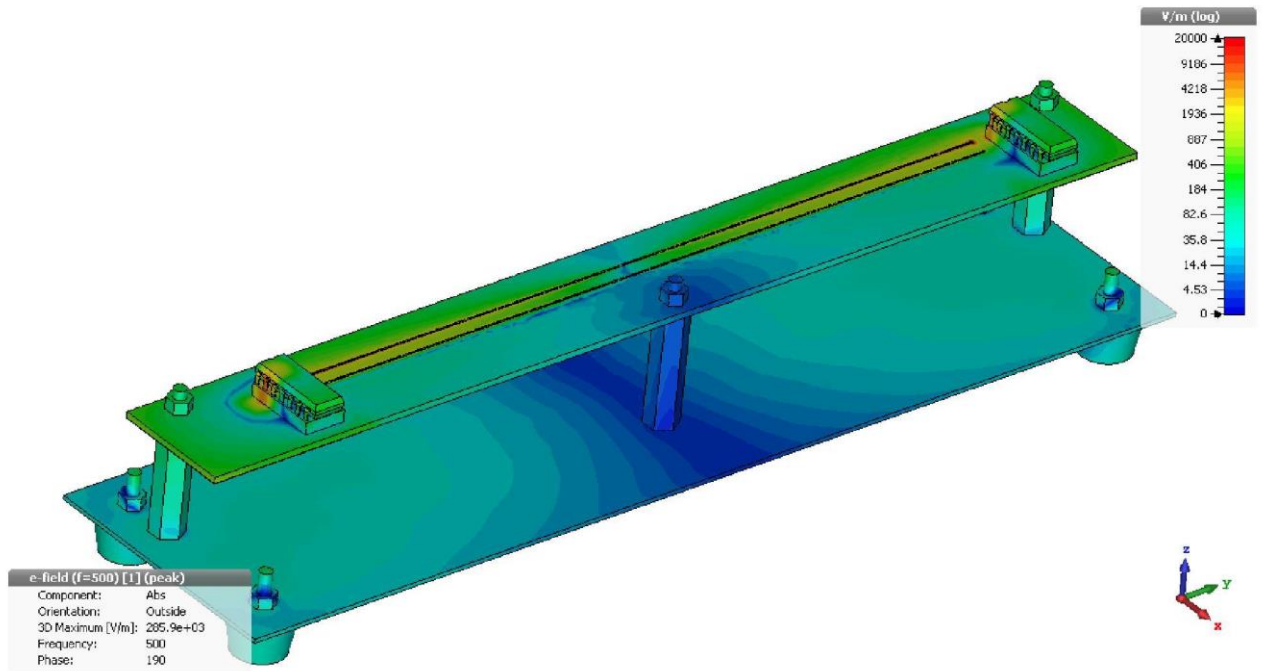


Рис. 3.27. Графічне зображення розподілу напруженості електричного поля по моделі.

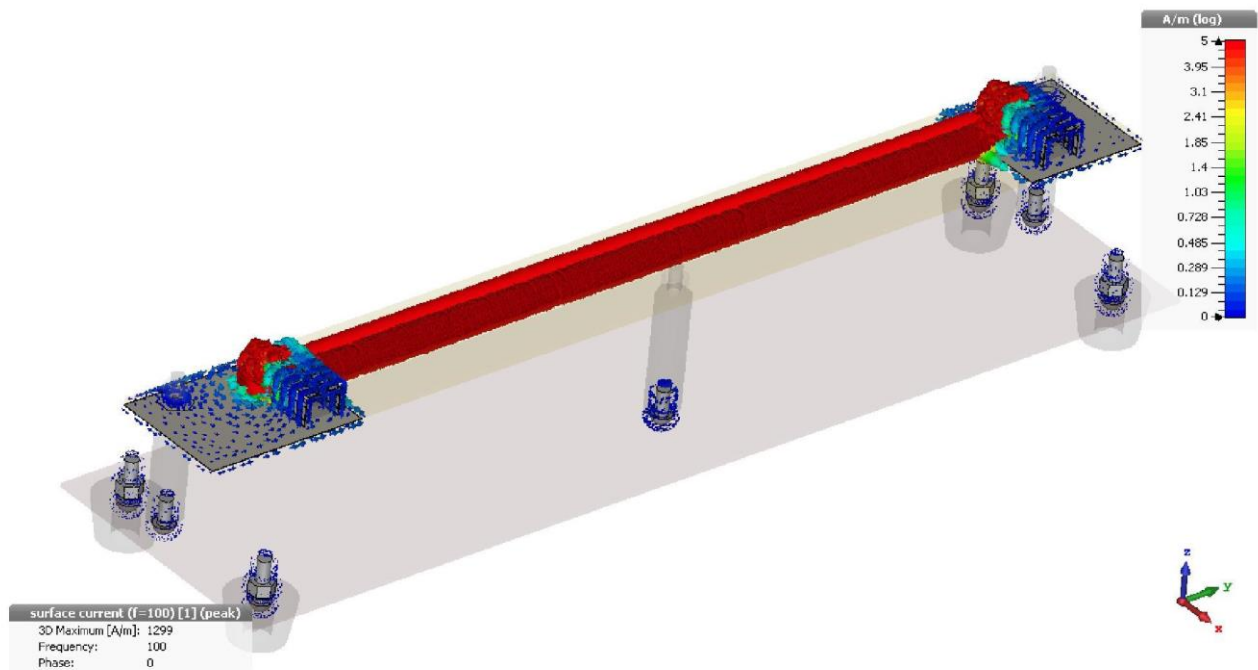


Рис. 3.28. Графічне зображення розподілу поверхневого струму.

Вимірювальні датчики (пробники) розташовуються на сфері з радіусом три метри, центр якої збігається з місцем розташування моделі. Розташування вимірювальних датчиків показано на рисунку 3.29.

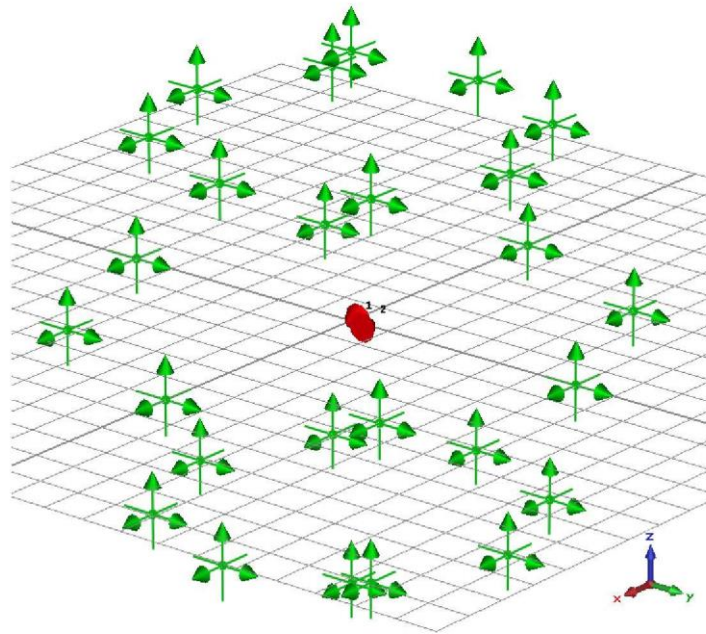


Рис. 3.29. Розташування вимірювальних датчиків навколо моделі пристрою.

Вимірювання рівня напруженості поля, створюваного пристроєм, вироблялося в смузі частот від 30 МГц до 1000 МГц. Як результат були обрані максимальні показання з усіх показань з пробників поля. Результати вимірювання наведено на рисунках 3.30 і 3.31.

Експериментальні результати свідчать про перевищення пристроєм норм на випромінюються ІРП. Результати моделювання значно відрізняються від експериментальних вимірювань рівнем і частотним положенням максимальних значень НЕП. У зв'язку з цим було прийнято рішення провести аналіз причин невідповідності результатів моделювання і вимірювання і визначити можливі причини їх розбіжності.

3.5. Аналіз можливих причин розбіжності результатів моделювання і вимірювань

Для аналізу причин розбіжності результатів моделювання і результатів вимірювань в CST була створена модель, яка включає в себе дві антени типу «півхвильовий симетричний вібратор» (приймальня і передавальна), налаштовані на частоту 100 МГц і розташовані на відстані 362 метра один від

одного, а також пробник поля, який є інструментом за замовчуванням для вимірювання напруженості поля в CST. Вид моделі з двох антен і пробника поля показаний на рисунку 3.34.

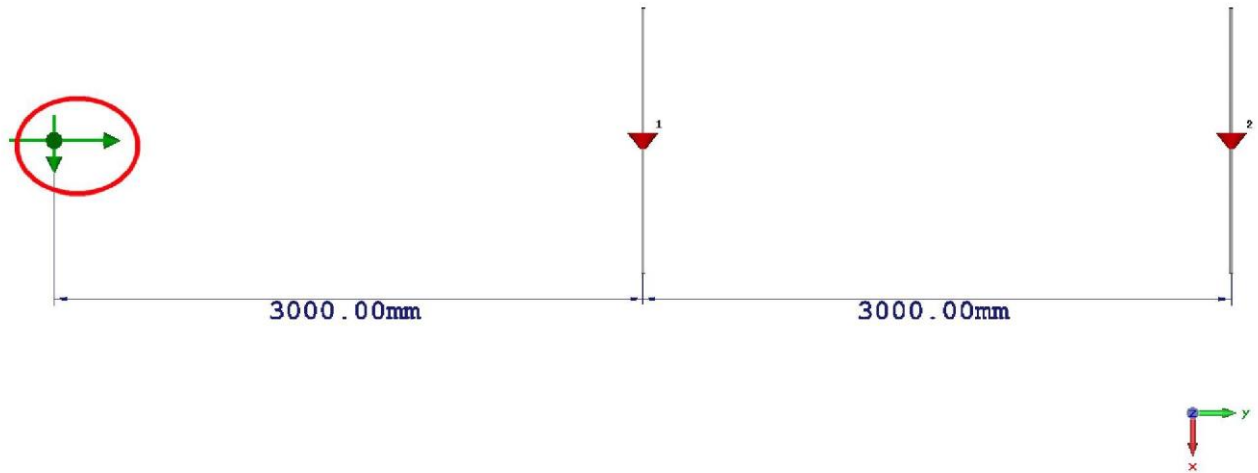


Рис. 3.34. Зовнішній вигляд моделі з двох антен і пробника поля для аналізу причин розбіжності результатів моделювання і вимірювань

Характеристики дипольних антен наведені на рисунках 3.35, 3.36, 3.37 і 3.38.

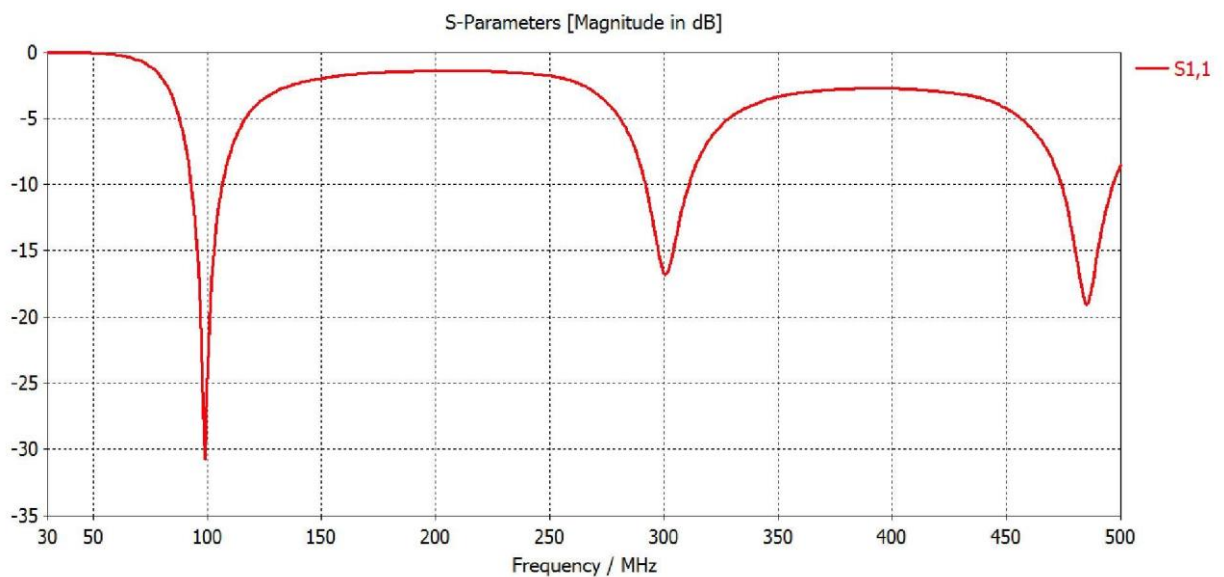


Рис. 3.35. Частотна залежність модуля коефіцієнта S_{11} дипольної антени.

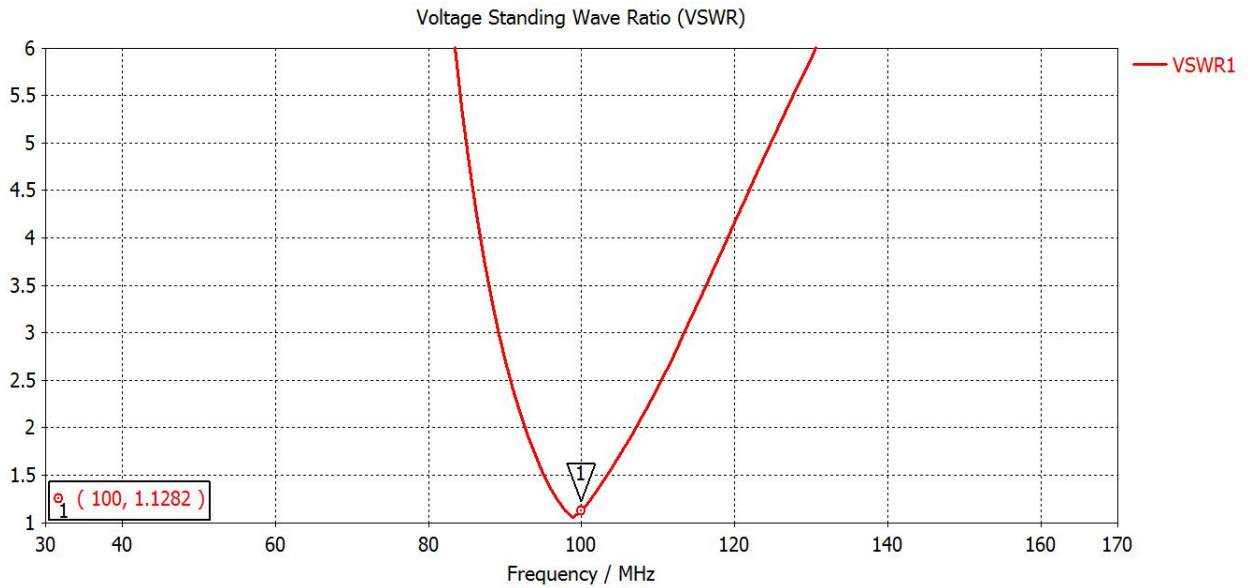


Рис. 3.36. Частотна залежність КСВ дипольної антени.

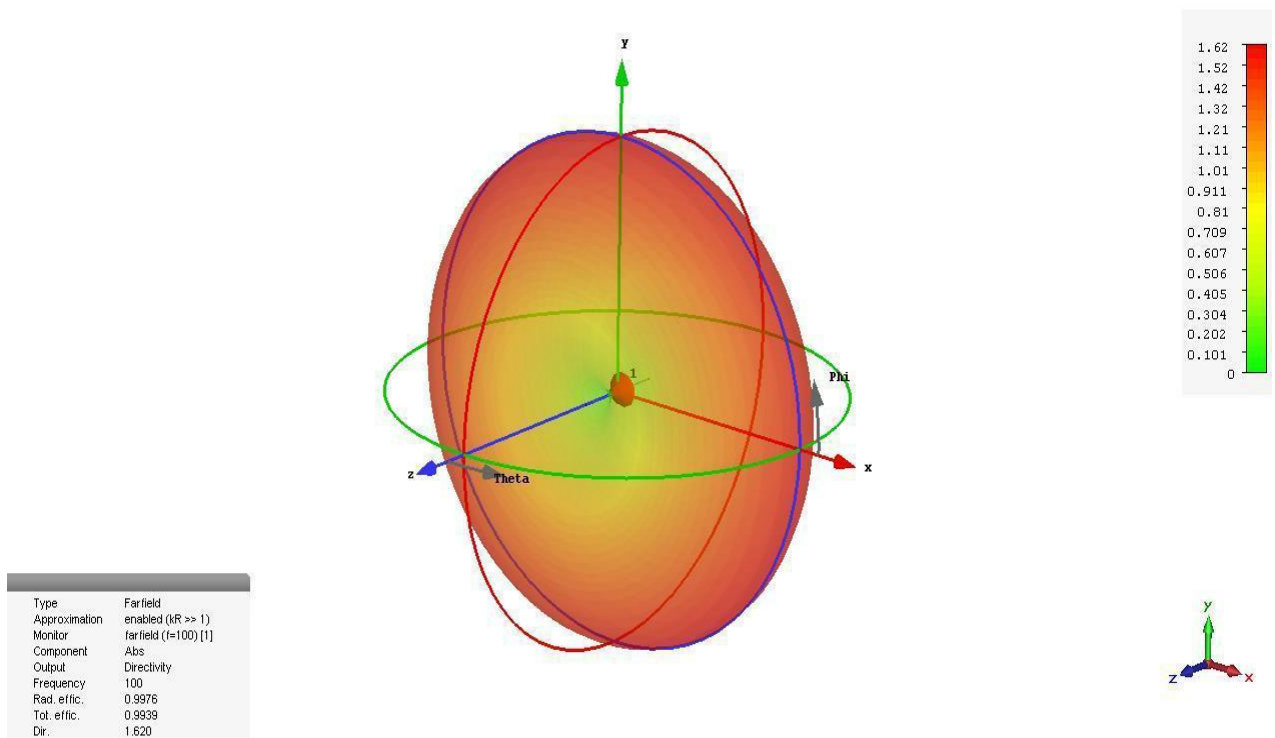


Рис. 3.37. Діаграма спрямованості дипольної антени.

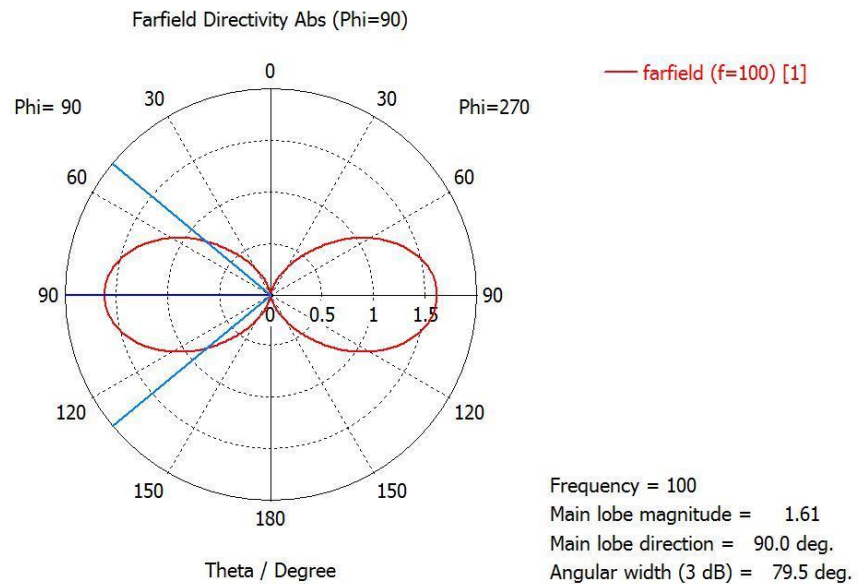


Рис. 3.38. Залежність КНД антени від напрямку при $\Phi = 90$ градусів

На вхід передавальної моделі, показаної на рисунку 3.39, (Порт 1) поступає синусоїдальний сигнал частотою 100 МГц з амплітудою 1 В. Параметри сигналу задаються в Schematic. Модель в Schematic пов'язана з тривимірної моделлю.

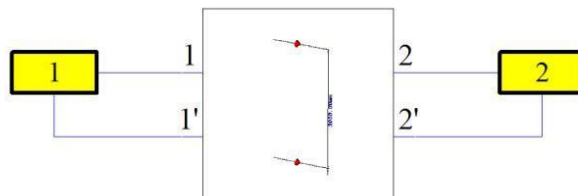


Рис. 3.39. Модель в Schematic.

На рисунку 3.40 показані осцилограми напруг на вході передає (порт 1) і приймає (порт 2) антен.

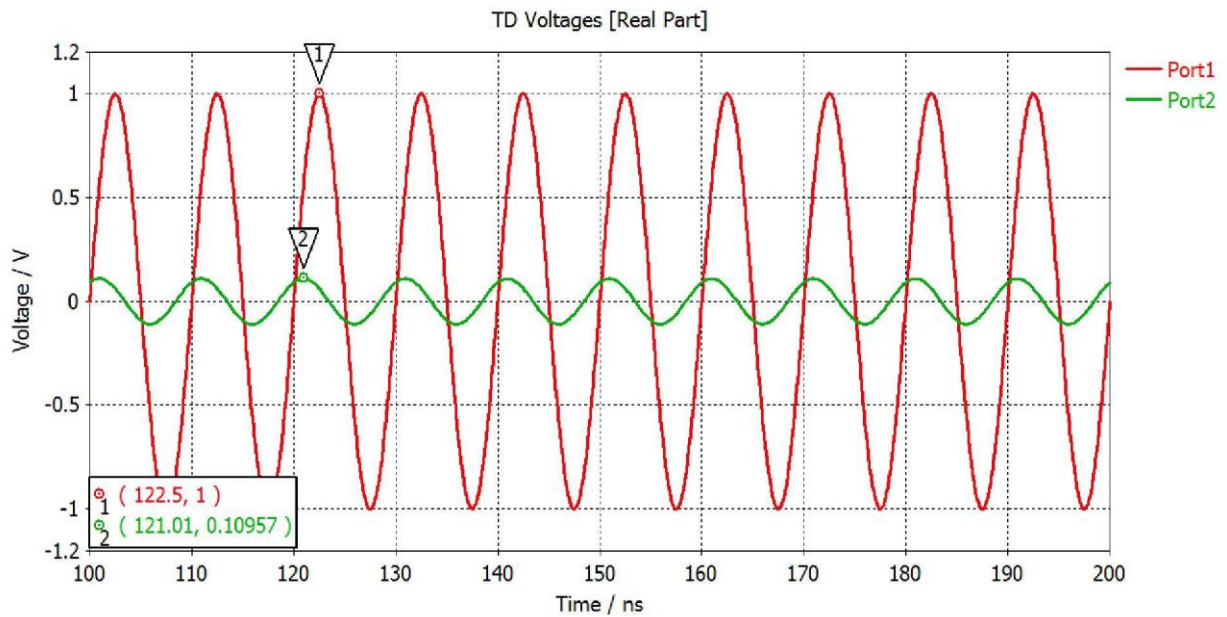


Рис. 3.40. Осцилограми напруг на вході передавальної і приймальної антен.

Знаючи амплітуди переданого і прийнятого сигналів, зробимо перевірку отриманих результатів. Визначимо напруженість поля, створену передавальною антеною на відстані 3 метри за формулою:

$$E_m = \frac{\sqrt{30 \cdot P_A \cdot G}}{r}, \quad (3.1)$$

де P_A - потужність, підведена до передавальної антени, Вт;

G - коефіцієнт посилення антени, б. р;

r - відстань, м.

r - відстань, м.

Знаючи амплітудне значення напруги на вході передавальної антени, визначимо потужність, підведену до передавальної антени:

$$P_A = \frac{U_d^2}{R} = \frac{0,707^2}{50} = 0,01 \text{ Вт}, \quad (3.2)$$

де U_d - діюче значення напруги на вході антени, В;

R - вхідний опір антени, Ом.

Визначимо коефіцієнт підсилення:

$$G = KНД \cdot KПД, \quad (3.3)$$

де $KСД$ - коефіцієнт спрямованої дії, б. р.;

$KКД$ коефіцієнт корисної дії, б. р.

За результатами моделювання визначимо коефіцієнт відображення і $KКД$

$$\Gamma = \frac{KСВ - 1}{KСВ + 1} = \frac{1,1282 - 1}{1,1282 + 1} = 0,06, \quad (3.4)$$

де $KСВ$ - коефіцієнт стоячої хвилі, б. р

$$KПД = 1 - \Gamma = 1 - 0,06 = 0,94, \quad (3.5)$$

Підставляючи значення, розраховане за формулою (4.4) і результати моделювання, в (3.3), визначимо коефіцієнт посилення

$$G = KНД \cdot KПД = 1,61 \cdot 0,94 = 1,513$$

Підставляючи отримані значення в формулу (3.1) визначимо напруженість поля створювану передавальною антеною на відстані 3 метри:

$$E_m = \frac{\sqrt{30 \cdot P_A \cdot G}}{r} = \frac{\sqrt{30 \cdot 0,01 \cdot 1,513}}{3} = 0,225 \text{ В/м},$$

Напруженість поля в децибелах, щодо 1 мкВ/м:

$$E_m = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{0,225}{1 \cdot 10^{-6}} \right) = 107,027 \text{ дБ (мкВ/м)}.$$

Визначимо напруженість на вході приймальної антени, якщо відома амплітуда напруги (рисунок 3.40).

$$E_{ex} = U_{ex} + AF, \quad (3.6)$$

де U_{ex} - напруга на вході антени, дБ (мкВ);

AF - антенний фактор, дБ (1/м).

За результатами моделювання напруга на вході приймальної антени в децибелах, щодо 1 мкВ рівне:

$$U_{ex} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{0,10957}{1 \cdot 10^{-6}} \right) = 100,794 \text{ дБ (мкВ)}. \quad (3.7)$$

Антенний фактор визначимо за формулою

$$AF = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{9,734}{\lambda \sqrt{G}} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{9,734}{3 \sqrt{1,513}} \right) = 8,075 \text{ дБ (1/м)}, \quad (3.8)$$

де λ - довжина хвилі, м;

G - коефіцієнт посилення антени, б. р.

За формулою (3.6) Визначимо напруженість на вході приймальної антен-ни в децибелах, щодо 1 мкВ / м:

$$E_{ex} = 100,794 + 8,075 = 108,869 \text{ дБ (мкВ/м)}.$$

Результати розрахунків близькі. Результати, отримані при вимірюванні антеною, на частоті 100 МГц можна вважати коректними.

Порівняння результатів вимірювань моделі, показаної на рисунку (рисунок 3.34), наведено на рисунку 3.41.

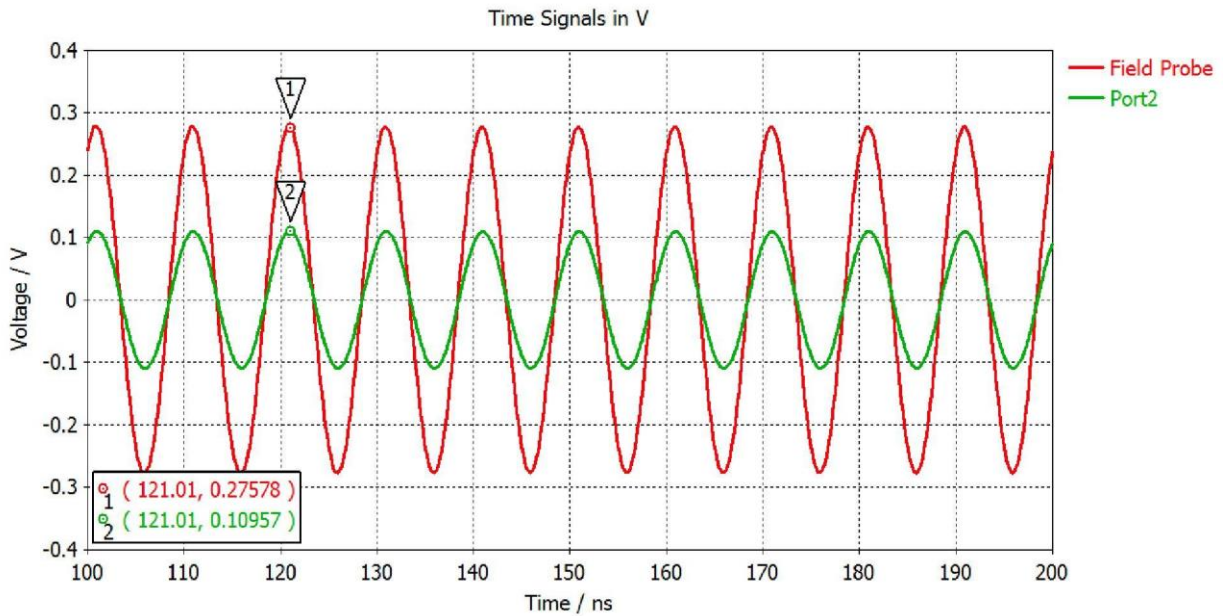


Рис. 3.41.- Осцилограми сигналу, прийнятого антеною (Port2) і пробником поля.

При однаковій відстані від передавальної антени свідчення пробника перевищують показання прийомної антени в 2,5 рази. З цієї причини можна зробити висновок, що при застосуванні інструменту «Field Probe» CST для вимірювання напруженості електричного поля результати виявляються вищими від очікуваних.

Для вимірювань випромінюваних ІРП було прийнято рішення використовувати дипольні антени. Для проведення вимірювань в смузі від 30 МГц до 1000 МГц необхідно врахувати частотну залежність антенного фактора ді-польної антени. У пакеті програм CST дана задача була вирішена наступним способом. Досліджуваний частотний діапазон (від 30 МГц до 1000 МГц) був розбитий з кроком 1 МГц. На кожній частоті була побудована діаграма спрямованості і визначено коефіцієнт посилення антени. За допомогою вбудованих механізмів CST (скриптів) за формулою (3.8) була розрахована частотна залежність антенного фактора (рисунок 3.42).

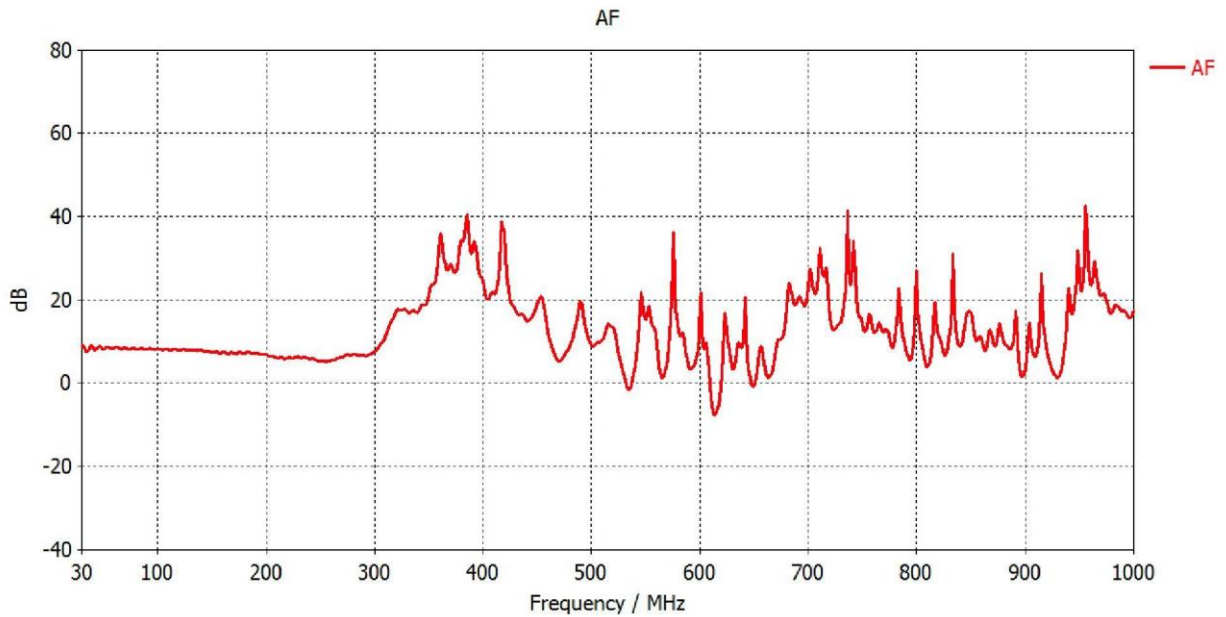


Рис. 3.42. Частотна залежність антенного фактора.

Для отримання правильних результатів і зменшення часу моделювання при використанні періодичних сигналів в довідковій системі CST даються такі поради:

а) При розрахунку моделі використовувати як збуджуюча сила сигналу за замовчуванням (рисунок 3.43). Пробники поля, встановлені на моделі, дозволять отримати частотні залежності напруженості поля в обраному діапазоні частот.

б) Для цікавить періодичного сигналу, який повинен користуватися як збудливий, необхідно застосувати перетворення Фур'є. Перетворення Фур'є можна застосувати за допомогою вбудованих шаблонів після обробки результатів. Потрібно взяти хоча б один повний період сигналу. Сигнал можна імпортувати з таблиці ASCII.

в) Необхідно помножити отриманий спектр періодичного сигналу на результати вимірювання, отримані в пункті 1. Множення також можна виконати за допомогою вбудованих шаблонів побудови результатів.

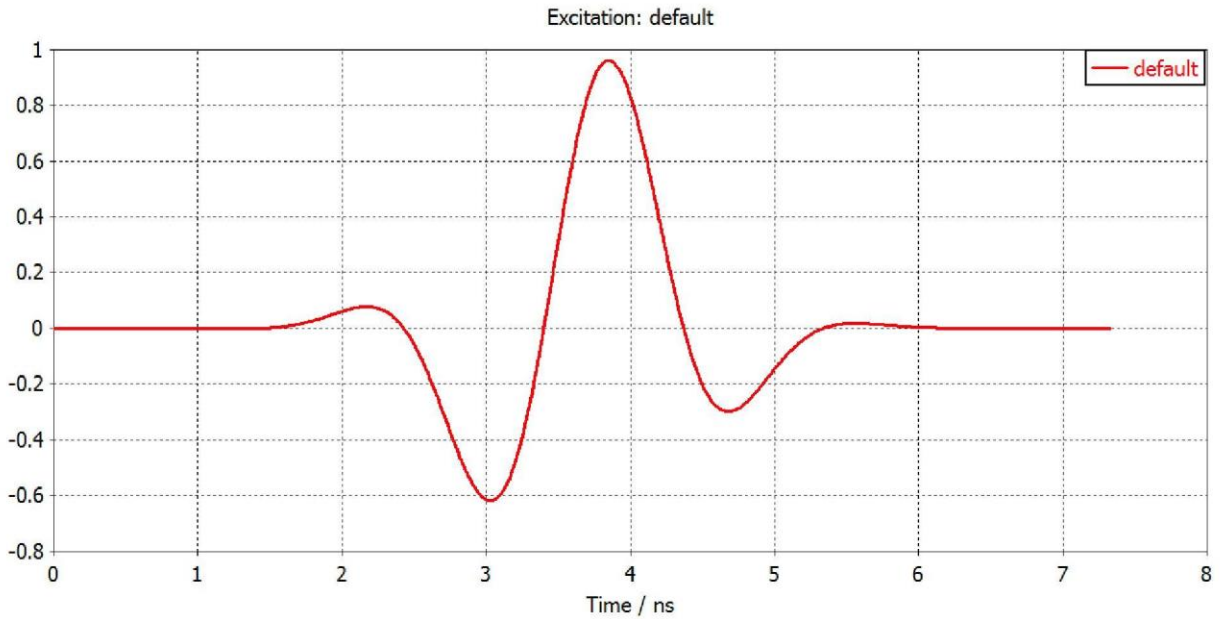


Рисунок. 3.43. Форма збудливого сигналу, використовуваного в CST за замовчуванням.

Як періодичного сигнал був узятий сигнал, форма якого показана на рисунку 3.24. За допомогою шаблонів після обробки результатів до сигналу було застосовано перетворення Фур'є (рисунок 3.44)

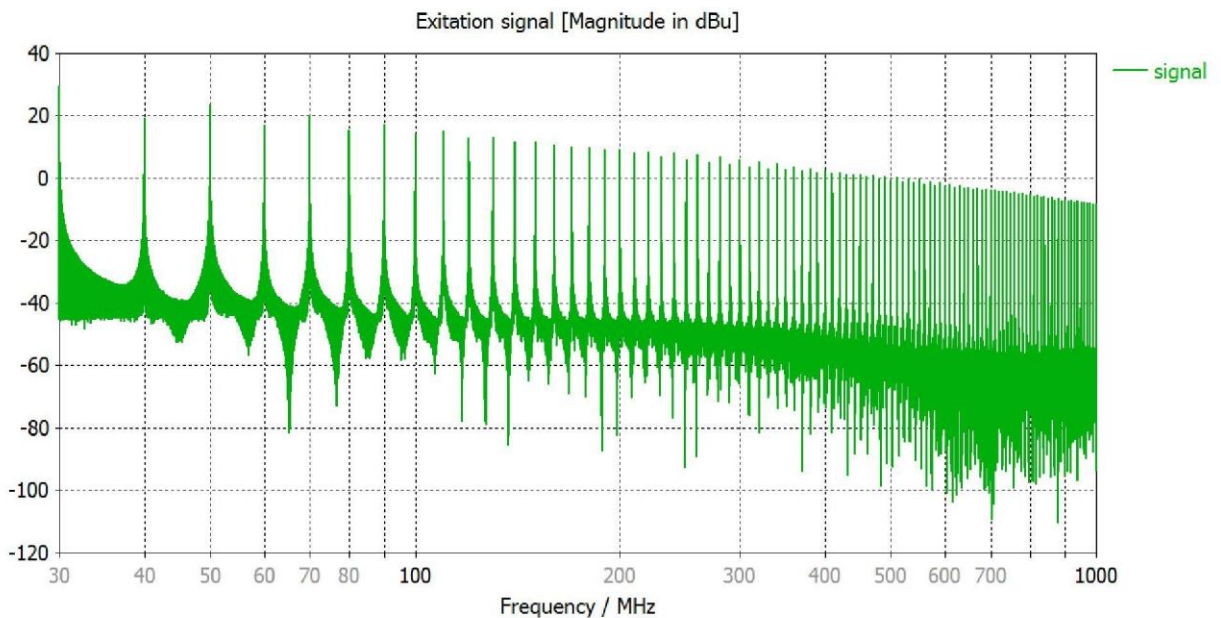


Рис. 3.44. Результат застосування перетворення Фур'є використовуваному періодичному сигналу.

Замість пробників поля (Field Probe) для вимірювання напруженості електричного поля в модель стенду для демонстрації емісії ІРП на основі генератора тактової частоти була додана раніше змодельована антена (рисунок 3.45).

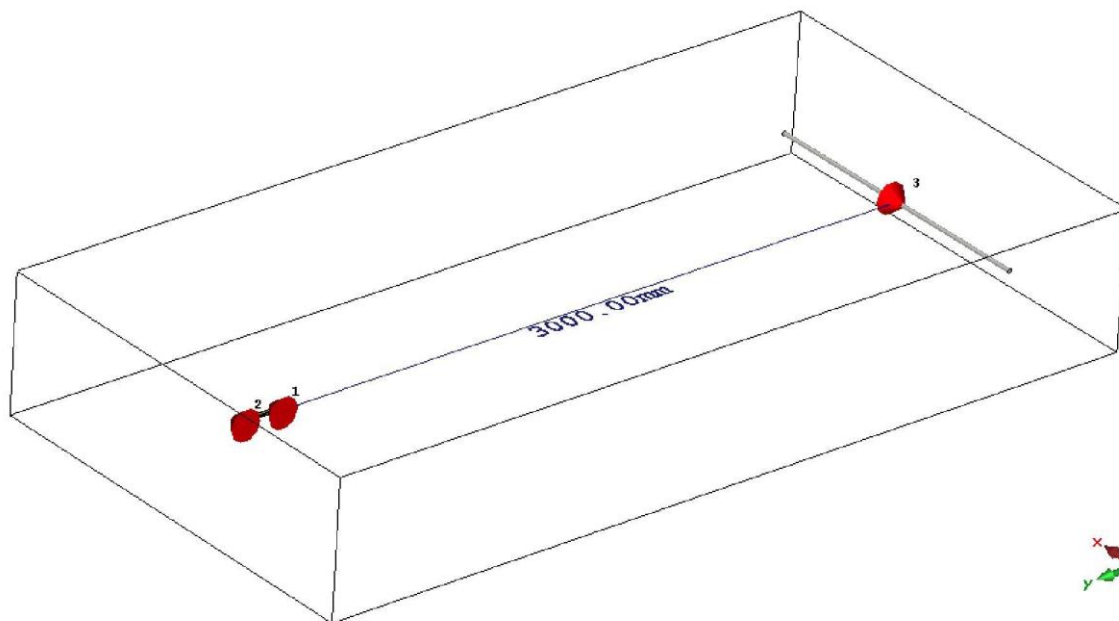


Рис. 3.45. Вид моделі в CST MWS.

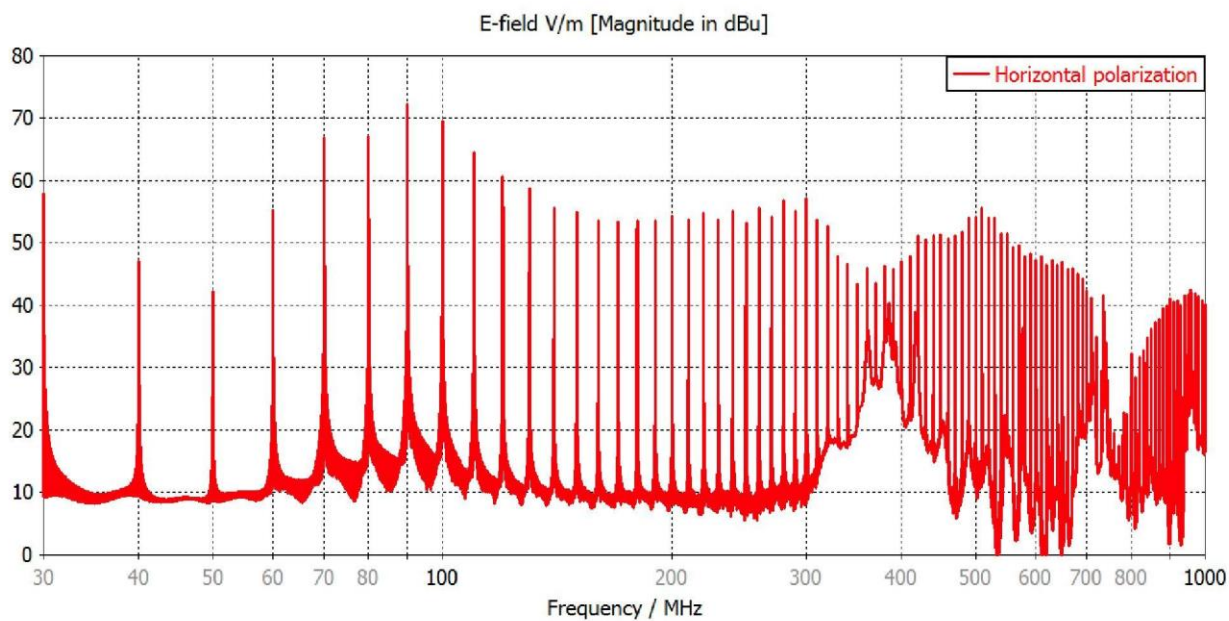


Рис. 3.46. Частотна залежність напруженості електричного поля на відстані три метри, отримана з антени в CST MICROWAVE STUDIO (горизонтальна поляризація антени, логарифмічний масштаб).

При використанні в якості збудливого сигналу сигнал, розрахований на рисунку 3.43, і з урахуванням нелінійної залежності, раніше розрахованого, антенного фактора від частоти, були отримані результати вимірювань випромінюваних ІРП, показані на рисунках 3.46 і 3.47.

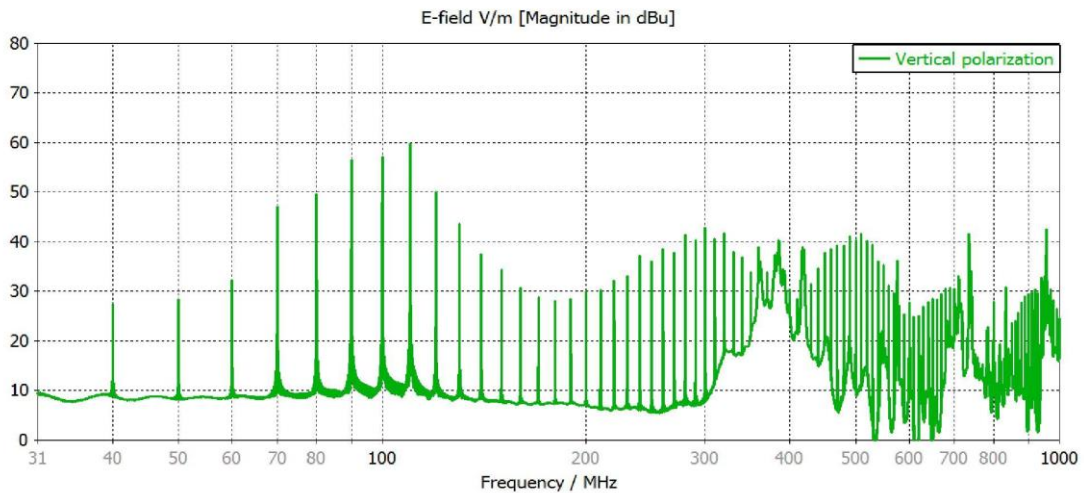


Рис. 3.47. Частотна залежність напруженості електричного поля на відстані три метри, отримана з антени в CST MICROWAVE STUDIO (вертикальна поляризація антени, логарифмічний масштаб).

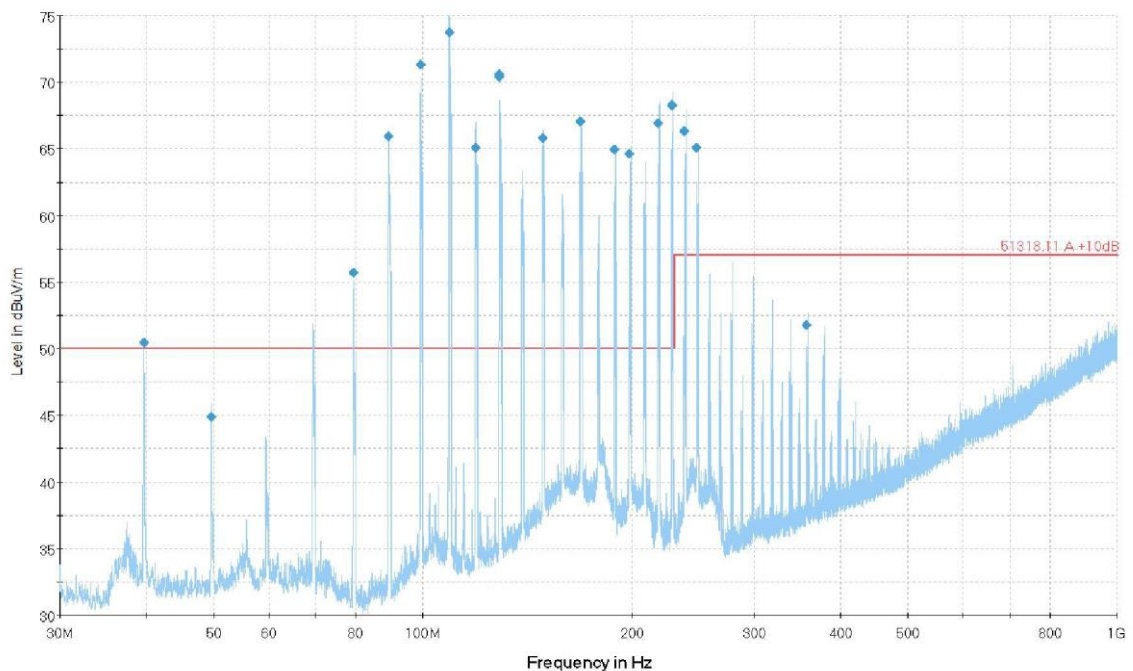


Рис. 3.48. Результати вимірювання напруженості електричного поля (максимізація результатів).

На рисунку 3.48 показані результати вимірювання напруженості електричного поля (максимізація результатів). На рисунку 3.49 показані максимальні значення напруженості електричного поля, отримані в про грамі CST STUDIO SUITE.

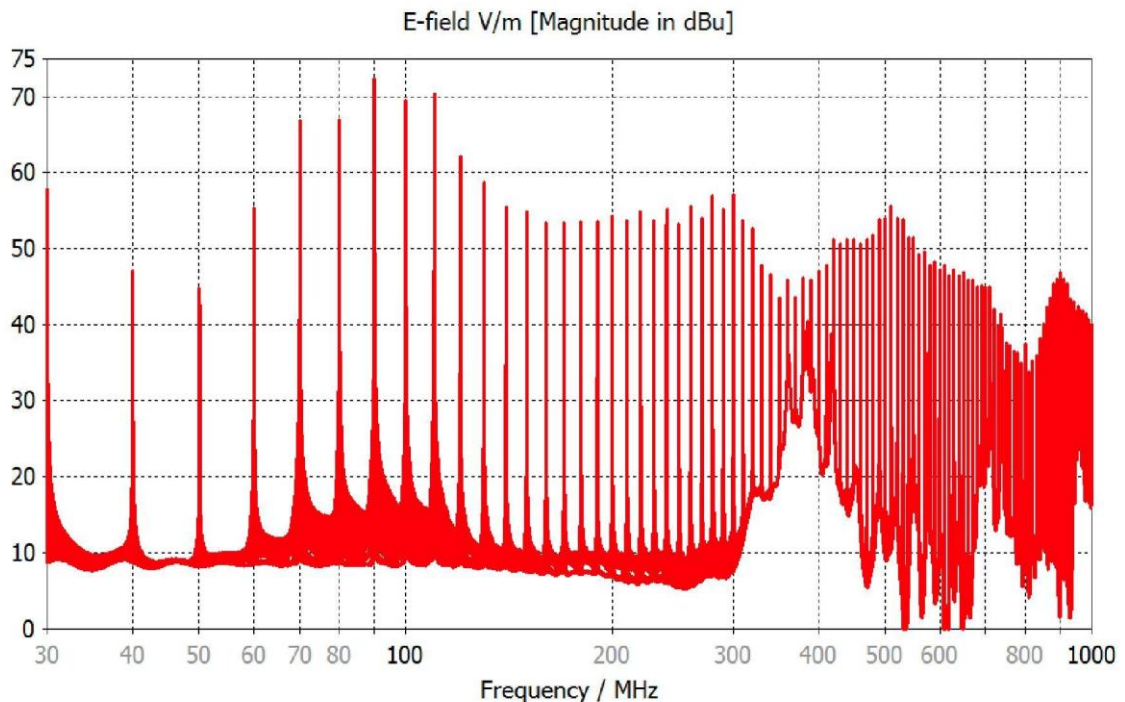


Рис 3.49. Максимальні значення напруженості електричного поля, отримані в програмі CST STUDIO SUITE.

У порівнянні з експериментальними, результати моделювання мають деякі відмінності: максимальні значення напруженості електричного поля зрушені в область низьких частот, також присутні відмінності за рівнем, які найбільш помітні на кінцях досліджуваного частотного діапазону.

Незважаючи на наявність розбіжності, результати моделювання дозволяють оцінити приблизний характер частотного розподілу випромінюваних пристроєм ІРП і визначити найбільш «проблемні» частоти.

3.6. Висновки до розділу 3

В розділі описано моделювання параметрів ЕМС імпульсних джерел

живлення які мають переваги у порівнянні з лінійними. Наведено модель імпульсного блоку живлення з широтно-імпульсною модуляцією та описано її характеристики. Також, описано роботу стенду для демонстрації емісії ІРП на основі генератора тактової частоти. Проведено аналіз можливих причин розбіжності результатів моделювання і вимірювань.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Охорона праці

В процесі проведення НДР із застосування системи виявлення сигналів, яка підключена до електромережі 220 В, може виникнути електротравматизм як факторів негативного впливу на умови праці обслуговуючого персоналу при роботі із системою. Тому розробка рекомендацій по питанням охорони праці щодо мінімізації негативного впливу електричного струму на обслуговуючий персонал при роботі із системою виявлення сигналів із застосуванням стандартів ГОСТ 12.1.009-76. «ССБТ. Електробезпека. Терміни і визначення» та ГОСТ 12.1.038-88 «Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов» є актуальною задачею.

Струм, який проходить крізь людину, є головним ушкоджуючим фактором при електротравмі. Згідно з ГОСТ 12.1.009-76 розрізняють три ступені впливу струму при проходженні через організм людини (змінний струм) [22]:

- відчутний струм – початок болісних відчуттів (до 0-1,5 мА);
- невідпускний струм – судоми і біль, важке дихання (10-15 мА);
- фібриляційний струм – фібриляція серця при тривалості діє струму 2-3с, параліч дихання (90-100 мА).

Основні причини нещасних випадків від дії електричного струму під експлуатації системи:

- випадковий дотик до струмопровідних частин пристрою, що перебувають під напругою;
- поява напруги дотику на металевих конструктивних частинах пристрою (корпусах) у результаті пошкодження ізоляції або з інших причин;

Гранично допустимі значення напруги доторкання та сили струму для нормального (безаварійного) та аварійного (пристрій має певні пошкодження) режимів пристрою при проходженні струму через тіло людини по шляху „рука - рука” чи „рука - ноги” регламентуються ГОСТ 12.1.038-88 (таблиці 4.1 та 4.2).

Таблиця 4.1

Граничнодопустимі значення напруги та сили струму, що проходить через тіло людини при нормальному режимі пристрою

Вид струму	$U_{\text{доп}}$, В (не більше)	I , мА (не більше)
Змінний, 50 Гц	2	0,3
Постійний	8	1

При виконанні роботи в умовах високої температури (більше 25 °С) і відносної вологості повітря (більше 75 %) значення таблиці 4.1 необхідно зменшити у три рази.

Таблиця 4.2

Граничнодопустимі значення струму, що проходять через тіло людини при аварійному режимі пристрою]

Вид струму	Нормоване значення	Тривалість дії струму t , с
Змінний, 50 Гц, $U_{\text{доп}}$, В (не більше) I , мА (не більше)	0,1 500 500	0,2; 0,5; 0,7; 1,0; Більше 1,0 250; 100; 70; 50; 36 250; 100; 70; 50; 6
Постійний $U_{\text{доп}}$, В (не більше) I , мА (не більше)	500 500	400; 250; 230; 200; 40 400; 250; 230; 200; 15

Електробезпека згідно ГОСТ 12.1.009-76 та ГОСТ 12.1.038-88 – це система організаційних і мехнічних заходів і засобів, які забезпечують захист людей від шкідливої і небезпечної дії електричного струму.

Основними заходами захисту від ураження електричним струмом при експлуатації системи:

- забезпечення недоступності струмопровідних частин, що перебувають під напругою, для випадкового дотику;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусі системи, що досягається захисним заземленням або захисним відключенням;
- захист від випадкового дотику до струмопровідних частин системи застосуванням кожухів або подвійної ізоляції;
- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції системи;
- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;
- організація безпечної експлуатації системи.

Профілактика пошкоджень ізоляції системи спрямована на забезпечення її надійної роботи. Насамперед необхідно виключити механічні пошкодження, зволоження, хімічний вплив, запилення, перегріву. Але навіть у нормальних умовах ізоляція поступово втрачає свої початкові властивості, "старіє". З часом розвиваються місцеві дефекти. Опір ізоляції починає різко зменшуватися, а струм витoku - непропорційно зростати. У місці дефекту з'являються часткові розряди струму, ізоляція вигорає. Відбувається так званий пробій ізоляції, внаслідок чого виникає коротке замикання, що, у свою чергу, може спричинити пожежу чи ураження людей струмом. Щоб підтримувати діелектричні властивості ізоляції пристрою, необхідно систематично виконувати профілактичні випробування, огляди, видаляти непридатну ізоляцію і замінити її.

Таким чином, врахувавши вище сформульовані рекомендації по питанням охорони праці при експлуатації системи реєстрації пульсового сигналу, буде забезпечено небезпечні умови праці обслуговуючого персоналу.

7.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Підвищення стійкості роботи об'єктів електроенергетики у воєнний час.

Найбільш повне та організоване виконання заходів ЦЗ на об'єкті досягається завчасним плануванням заходів, які необхідно проводити при загрозі та виникненні надзвичайних ситуацій. При плануванні використовуються необхідні вихідні дані та довідкові матеріали з урахуванням специфіки роботи та особливостей щодо відомчої та регіональної діяльності підприємства, організації чи установи. Критерієм оцінки якості планування є відповідність прогнозованої та реальної дійсності при відпрацюванні завдань ЦЗ.

Основою планування заходів ЦОЗ є науково-обґрунтований прогноз можливої обстановки, що може скластися при виникненні НС. Прогноз можливої обстановки при виникненні НС загальнодержавного, регіонального та місцевого рівнів розробляється заздалегідь виходячи з особливостей виробничої

діяльності об'єкта та умов його розташування. В основу планів ЦЗ закладаються засоби досягнення поставлених цілей і необхідні для цього сили та кошти, із числа наявних у системі ЦЗ на період планування заходів. При плануванні заходів ЦЗ необхідно враховувати часові показники виникнення виробничих аварій, катастроф, стихійного лиха та швидкоплинність зміни ситуацій. Особливу увагу варто звернути на питання управління, оповіщення, зв'язку та усім видам забезпечення будь-яких дій сил ЦЗ і населення в зонах НС.

З метою запобігання і реагування на надзвичайні ситуації на об'єктах господарювання розробляється ряд документів планування:

1. Плани дій органів управління та сил ЦЗ із запобігання і ліквідації надзвичайних ситуацій.
2. План розвитку та удосконалення цивільного захисту об'єкта.
3. План захисту від сильнодіючих отруйних речовин (для хімічно небезпечних об'єктів)
4. План роботи комісії з питань НС (розробляє комісія з питань НС).

План дій органів управління і сил ЦЗ (міністерств, відомств, областей, районів, міст, підприємств, установ і організацій) із запобігання і ліквідації надзвичайних ситуацій розробляється з урахуванням законодавчих, директивних і нормативних документів і призначений для координації діяльності центральних і місцевих органів виконавчої влади, керівництва ОГД, а також оперативності їх реагування на загрозу і виникнення НС, відвернення або зниження можливої загибелі людей, мінімізацію матеріальних збитків і втрат та організацію задоволення першочергових потреб населення, яке постраждало.

План визначає порядок дій і відповідальність керівництва відповідних органів управління підприємств, установ і організацій, а також основні заходи щодо організації і проведення робіт із запобігання і ліквідації НС техногенного і природного походження, узгодження термінів їх виконання, фінансові, матеріальні та інші ресурси, які необхідні для цих заходів і робіт. У план дій включаються заходи щодо захисту робітників і службовців, підтримування виробничої діяльності та інші з урахуванням обстановки після виникнення НС, передбачаються необхідна кількість сил і засобів для ліквідації її наслідків.

План дій розробляється на підставі наказу начальника ЦЗ об'єкта. До розроблення документів плану залучається керівний склад і спеціалісти об'єкта. План дій органів управління і сил ЦЗ із запобігання та ліквідації НС — це програма здійснення запобіжних та захисних заходів, що дозволяє цілеспрямовано та організовано вирішувати завдання ЦЗ в умовах надзвичайних ситуацій. Основу плану складають заходи щодо захисту робітників, службовців і членів їх сімей. При визначенні цих заходів враховується важливість та особливості виробничої діяльності об'єкта, основні завдання органів управління та сил ЦЗ щодо запобігання і ліквідації НС. Окремо складаються «План дій органів управління та сил ЦЗ на випадок надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру» і «План дій органів управління та сил ЦЗ при переведенні з мирного на воєнний стан».

«План дій органів управління та сил ЦЗ на випадок надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру» складається із п'яти розділів текстової частини і додатків до них. Текстова частина плану включає:

Висновки із оцінки обстановки на території об'єкта. У цьому розділі викладається загальна характеристика території, енергетичного та промислового комплексу, комунікацій, під'їздних шляхів та транспортних доріг на об'єкті, вірогідних надзвичайних ситуацій техногенного та природного походження, їх масштаб і наслідки, які визначаються на підставі експертної оцінки, прогнозу чи результату модельних експериментів, проведених кваліфікованими експертами.

Приведення в готовність та організація роботи органів управління у НС. У розділі викладається порядок надходження інформації про загрозу та виникнення НС, терміни оповіщення та збору керівного складу ЦЗ в робочий та неробочий час.

Дії людини, яка отримала інформацію про загрозу та виникнення НС:

— інформування керівництва об'єкта; — оповіщення керівного складу ЦЗ та персоналу об'єкта;

— порядок та форма доповіді вищій інстанції. Дії начальника ЦЗ з отриманням інформації про загрозу та виникнення НС:

— віддача розпорядження на збір керівного складу ЦЗ об'єкта;

- доповідь начальнику ЦЗ району (міста) про обстановку, яка склалася, прийняті рішення та вжиті заходи;
- прийняття і доведення рішення до підлеглих на запобігання (ліквідацію) НС;
- практичне керівництво проведенням робіт щодо запобігання або ліквідації наслідків НС і ходом евакуації персоналу (при необхідності);
- щодобове підведення підсумків щодо ліквідації наслідків НС та інформація вищої інстанції.

Дії начальника штабу ЦЗ об'єкта з отриманням інформації про загрозу та виникнення НС:

- інформування начальника ЦЗ про НС, організація роботи комісії з НС;
- уточнення обстановки в районі НС, визначення потреби в силах і засобах;
- проведення аналізу та оцінки обстановки, уточнення завдань опергрупи;
- постановка завдання старшому оперативної групи, яка виїжджає в район (місце) НС, порядок зв'язку, взаємного інформування;
- підготовка пропозицій щодо першочергових робіт;
- уточнення питань взаємодії;
- при необхідності виїзд у район НС для організації керівництва.

Порядок дій оперативної групи, комісії з питань НС, головних спеціалістів (начальників служб ЦЗ) об'єкта.

4.3. Висновки до розділу 4

У підрозділі з охорони праці сформульовані рекомендації по охорони праці з питань електробезпеки обслуговуючого персоналу при експлуатації системи виявлення сигналів і тим самим мінімізовано ризик ушкодження персоналу електричним струмом. У підрозділі з безпеки в надзвичайних ситуаціях проаналізовано підвищення стійкості роботи об'єктів електроенергетики у воєнний час.

ВИСНОВКИ

Метою цієї роботи є моделювання характеристик ЕС радіоелектронних засобів. Для досягнення зазначеної мети перед був поставлений ряд завдань.

При вирішенні завдання аналізу можливості застосування пакету програм CST STUDIO SUITE для моделювання характеристик ЕС радіоелектронних засобів, були вивчені різні інформаційні джерела: статті, вебінари, довідкова система CST [17]. Виконання завдання ускладнював той факт, що пакет програм CST STUDIO SUITE на даний час не набув широкого поширення.

При вирішенні завдання розробки моделі лабораторного стенду для демонстрації паразитних електромагнітних зв'язків ближнього поля конструктивні особливості стенда, експериментальні результати були взяті з джерела. В результаті моделювання була підтверджена виявлено експериментальна залежність амплітуди напруги на другій лінії від амплітуди напруги на лінії, яка підключена до генератора. Величина зв'язку між лініями залежить від величини опору, підключеного до другої лінії.

В рамках моделювання параметрів ЕМС імпульсних джерел живлення були розроблені моделі двох імпульсних джерел живлення.

Джерело живлення з мультівібратором, за результатами моделювання, відповідає вимогам ЕМС, це також підтверджують експериментальні результати. Джерело живлення з ШІМ не відповідає встановленим нормам. Для зменшення рівня перешкод необхідно застосування завадоперешкоджуючих фільтрів. В ході розробки моделі пристрою для демонстрації емісії ІРП на основі генератора тактової частоти було встановлено, що при прямолінійному підході до вирішення задачі моделювання випроцінованих ІРП і використання стандартних інструментів в CST, таких як Field Probe, неможливе можна отримати коректні результати без введення поправок і виконання спеціальних прийомів, які були описані в розділі 3.

При вирішенні завдань проведення випробувань для вимірювання характеристик ЕС були вивчені методика проведення експериментів і вимоги до вимірювальної апаратури, згідно [12], [13], [18].

Для забезпечення безпечної та надійної роботи, всі електронні пристрої повинні відповідати стандартам щодо ЕС.

З використанням засобів моделювання CST STUDIO розробник може досліджувати широкий спектр характеристик ЕМС пристрої до проведення вимірювань в лабораторії. Моделювання може бути використано на будь-якому етапі процесу проектування продукту зберігаючи тим самим і засоби на етапі розробки пристрою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения [Текст]: ГОСТ Р 50397-2011. – Введ. 08.12.2011. – М.: Стандартиформ, 2011. – 61 с.
2. Князев А. Д. Конструирование радиоэлектронной вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости [Текст] / А. Д. Князев. – М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.: ил.
3. Электромагнитная совместимость технических средств. [Текст]: ТР ТС 020/2011. – Введ. 09.12.2011. – М.: Стандартиформ, 2011. – 29 с.
4. Обзор продуктов компании Computer Simulation Technology: [Элек-тронный ресурс]. – (<http://www.eurointech.ru/cst>).
5. Barchanski A. EMC Simulation of Consumer Electronic Devices // High Frequency Design. – 2013. – №7. – P. 32–38.
6. Johns D., DeRoy P. Simulating Crosstalk and EMI in Cables // Microwave Journal. Cables and Connectors 2013. – 2013. – P. 6–18.
7. Уайт Д. Р. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Внутрисистемные помехи и методы их уменьшения [Текст] / Д. Р. Уайт. – М.: Советское радио, 1977. – 347 с.
8. Давыдов Е. И. Разработка лабораторных стендов по дисциплине «Электромагнитная совместимость устройств и систем» [Текст]: диплом. работа / Е. И. Давыдов; Уральский федеральный университет, УрФУ. – Екатеринбург, 2014. – 95 с.
9. Шустов М. А. Практическая схемотехника. Преобразователи напряжения [Текст] / М. А. Шустов. – М.: Альтекс-А, 2002. – 175 с.
10. Простейший ИБП: [Электронный ресурс]. – (<http://сhem.net/pitanie/5-264.php>).
11. Texas Instruments. WEBENCH SpiceRack Device Model Search: [Элек-тронный ресурс]. – (<http://webench.ti.com/webench5/spicemodels/#>).
12. Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и

помехоустойчивости и методы измерений [Текст]: ГОСТ 30805.16.1.2-2013. – Введ. 01.01.2014. – М.: Стандартиформ, 2014. – 66 с.

13. Совместимость технических средств электромагнитная. Промышленные, научные, медицинские и бытовые (ПНМБ) высокочастотные устройства. Радиопомехи промышленные. Нормы и методы измерений

[Текст]: ГОСТ Р 51318.11-2006. – Введ. 01.07.2006. – М.: Стандартиформ, 2007. – 36 с.

14. Vishay-1N4148W product information: [Электронный ресурс]. – (<http://www.vishay.com/product?docid=85748>).

15. Vishay-SL42, SL43, SL44 product information: [Электронный ресурс]. – (<http://www.vishay.com/product?docid=88742>).

16. Clayton R. Paul. Introduction to Electromagnetic Compatibility // by John Wiley & Sons. – 2006. – P. 78–81.

17. CST - Computer Simulation Technology: [Электронный ресурс]. – (<https://www.cst.com>).

18. Совместимость технических средств электромагнитная. Бытовые приборы, электрические инструменты и аналогичные устройства. Устойчивость к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний [Текст]: ГОСТ 30805.14.2-2013. – Введ. 22.07.2013. – М.: Стандартиформ, 2014. – 58 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Копія тези конференції

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

МАТЕРІАЛИ

ІХ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ,
СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**



8–9 грудня 2021 року

ТЕРНОПЛЬ
2021

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Р.А. Бутій, С.А. Лупенко ПРИНЦИП КЕРУВАННЯ РОБОТИЗОВАНОЮ РУКОЮ ЗІ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОІНТЕРФЕЙСУ R.A. Butsiy, S.A. Lupenko THE PRINCIPLE OF CONTROLLING A ROBOTIC ARM WITH FEEDBACK VIA A NEUROINTERFACE	3
С.В. Венгер, М.І. Яворська ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛУ В МІКРОСХЕМІ AD598 S.V. Venger, M.I. Yavorska INVESTIGATION OF THE FEATURES OF THE SIGNAL CONVERSION PROCESS IN THE AD598 CHIP	4
Н. Гашчун, Н. Круча, Г. Семенюшин ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ НАГРІВУ ДИСКА N. Gashchun, N. Krucha, H. Semenyushyn ENGINEERING METHOD OF CALCULATION OF DISC HEATING	6
А.Т. Гефко, М.В. Пшенничий, Т.С. Дубняк ОЦІНКИ МЕЖ ДЕФОРМАЦІЇ БАЛКИ ПРИ ВАРІАЦІЇ ЇЇ ПОПЕРЕЧНИХ РОЗМІРІВ МАТЕРІАЛУ І ПРИКЛАДЕНИХ ЗУСИЛЬ A.T. Hefko, M.V. Pshenychnyi, T.S. Dubyniak ESTIMATES OF LIMITS OF DEFORMATION OF A BEAM AT VARIATION OF ITS CROSS SIZES OF MATERIALS AND APPLIED EFFORTS	8
В. Дунець, Ю. Кутс, Н. Трач МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОСИГНАЛУ ІЗ ФАЗОВОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ V. Dunets, Yu. Kuts, N. Trach MODELING OF RADIO SIGNAL WITH PHASE MODULATION FOR ASSESSMENT OF COMMUNICATION DIFFICULTY	10
Р.М. Карабін, І.В. Литвищенко ВИБІР АДЕКВАТНОЇ МОДЕЛІ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ R.M. Karabin, I.V. Lytvynenko CHOOSING AN ADEQUATE MODEL BASED ON APPLICATION OF DECISION-MAKING SUPPORT METHODS	11
А.Б. Кашчун, В.А. Невожай, М.І. Яворська ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРИСТРОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ДЕТАЛЕЙ З ПЛОСКОЮ ПОВЕРХНЕЮ A.B. Kashchushyn, V.A. Nevozhai, M. I. Yavorska INFORMATION SUPPORT FOR THE DEVICE USING THE PARAMETERS OF THE ROUGHNESS OF PARTS WITH A FLAT SURFACE	12
А. Марценюк, Б. Андрійчук, А. Шіпський МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОСИГНАЛУ ІЗ АМПЛІТУДНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ A. Martsenyuk, B. Andriyчук, A. Shchipsky MODELING OF RADIO SIGNAL WITH AMPLITUDE MODULATION FOR ASSESSMENT OF COMMUNICATION DIFFICULTY	14

УДК 621.376

В. Дунець канд. техн. наук., Ю. Куц, Н. Трач

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОСИГНАЛУ ІЗ ФАЗОВОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ

UDC 621.376

V. Dunetc, PhD, Yu. Kuts, N. Trach

MODELING OF RADIO SIGNAL WITH PHASE MODULATION FOR ASSESSMENT OF COMMUNICATION DIFFICULTY

Для щоб передати сигнал будь-якої природи походження з однієї точки в іншу на відстань, необхідно використати канал зв'язку; вид кодування (модуляції). В процесі передачі сигналу із використанням радіоканалу виникає ряд труднощів, які пов'язані із проблемою завадостійкості каналу як кількісного показника його якості. Тому в роботі розглянуто питання моделювання радіосигналу для оцінювання завадостійкості його передачі по каналу радіозв'язку із фазовою модуляцією.

Радіосигнал розглянуто як адитивну суміш фазово-модульованого корисного сигналу та завади у вигляді виразу: $\xi(t) = s(t) + n(t)$, $t \in \mathbb{R}$, де $s(t)$ – фазово-модульований корисний сигнал, $n(t)$ – завада.

Із застосуванням програмного середовища Matlab здійснено процес фазової модуляції над радіосигналом (синусоїда) із різними значеннями частоти несучої та девіації частоти.

Для того, щоб визначити наскільки канал зв'язку з фазовою модуляцією при різних несучих частотах є завадостійким здійснено процес адитивного додавання шуму до фазо-модульованих реалізацій.

Для того, щоб визначити наскільки фазова модуляція є завадостійкою при різних несучих, здійснено процес демодуляції. Результат демодуляції та залежність відношення сигнал/шум як показник завадостійкості каналів зв'язку від частоти несучої зображені на рис.4.

За отриманими результатами встановлено, що завадостійкість каналу радіозв'язку із фазовою модуляцією збільшується із збільшенням частоти несучої.

Оцінювання достовірності передачі сигналу по радіоканалу із фазовою модуляцією зведено до задачі виявлення сигналу у суміші із завад із використанням статистичного критерію Неймана-Пірсона [1].

Використовуючи статистичного критерію Неймана-Пірсона та засоби MATLAB отримано криві виявлення сигналу (значення достовірностей) [2].

Можливість виявлення радіосигналу із фазовою модуляцією при оптимальному прийомі з заданими ймовірностями p_F і p_D не залежить від форми сигналу і визначається тільки піковим відношенням сигнал-шум на виході, тобто відношенням енергій сигналу і шуму.

Література.

1. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ радиотехнических устройств и систем: Учебное пособие для высших учебных заведений. - Москва: Радио и связь, 1991. - 608с.
2. Кравчик Б. Виявлення радіосигналів у суміші із завадами / Б. Кравчик, В. Дунець // ІМСТ, 11-12 грудня 2019 року. – Т. : ТНТУ, 2019. – С. 54.