

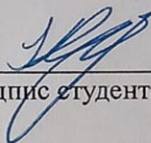
Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «бакалавр»

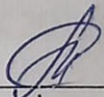
на тему: Дослідження мережевих фільтрів низьких частот

за освітньою програмою «Система керування рухом поїздів»
зі спеціальності: 273 «Залізничний транспорт»

Виконав: студентка групи СК20120

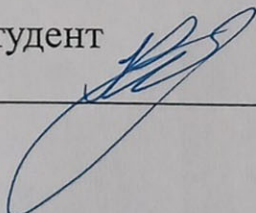
 / Денис КУЛКОВ /
(підпис студента)

Керівник: доцент кафедри АТ

 / Тетяна СЕРДЮК /
(підпис керівника)

Засвідчую, що у цій роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент


(підпис студента)

Дніпро – 2023 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies**

Faculty of Computer Technologies and Systems

Department of Automation and Telecommunication

Explanatory Note

to Master's Thesis

master

(higher education degree)

on the topic: Research of low-pass network filters

according to educational curriculum «Train movement control systems»
in the Specialty: 273 Railway transport

Done by the student of the group CK20120

/ Denis Kulikov /

Scientific Supervisor: associate professor

/ Tetiana Serdiuk /

Dnipro – 2023

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерних технологій і систем
Кафедра: Автоматика та телекомунікації
Рівень вищої освіти: Перший (бакалаврський)
Освітня програма: Системи керування рухом поїздів
Спеціальність: 273 Залізничний транспорт
(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____

(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
Дата _____

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу бакалавра
(ступінь вищої освіти)
студенту Куліков, Денис
(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: Дослідження мережевих фільтрів низьких частот поїздів

Керівник роботи: Сердюк, Тетяна Миколаївна, к.т.н., доцент
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від "25 "жовтень 2022 р. № 1093
-ст

2. Строк подання студентом роботи: 25.05.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Фільтр Shafner FN 2030-10-06 – 110/220 В,
50 Гц, 10 А; $C=0,47$ мкФ (X2), $R=680$ кОм;
 $L=2 \times 8$ мГн, $C2=2 \times 4,7$ нФ

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина: аналіз існуючих фільтрів низьких частот

4.2 Основна частина: дослідити роботу мережевих фільтрів в різних режимах заземлення і при різній якості монтажу

1. 5. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Аналітична частина	Сердюк Т.М., доцент	28.02.2023	25.05.2023
Основна частина	Сердюк Т.М., доцент	28.02.2023	25.05.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	28.02.2023	
2	1 Автоматична переїзна сигналізація. Аналіз відмов і методів діагностування	28.02.2023	
3	Розробка лабораторного стенду для дослідження роботи двигуна постійного струму паралельного збудження	28.03.2023	
4	Діагностика стану електричного двигуна постійного струму	25.04.2023	
5	Технологічна карта ремонту електричного двигуна постійного струму	25.04.2023	
6	Висновки	23.05.2023	
7	Перелік посилань	23.05.2023	
8	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	25.05.2023	
9	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії		

Студент

_____ (підпис)

Денис КУЛІКОВ

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Тетяна СЕРДЮК

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Відомості про об'єм пояснювальної записки:

- 49 сторінки,
- 27 рисунків,
- 1 таблиць
- 16 джерел використаної літератури.

Завдання дипломної роботи дослідити роботу мережевих фільтрів при різних видах заземлення і якості монтажу.

Мета роботи – дослідження роботи мережевих фільтрів за різних умов монтажу.

В першому розділі виконано аналіз існуючих типів фільтрів низьких частот.

В другому розділі досліджено мережеві фільтри.

В третьому розділі виконано моделювання і виміри залежності згасання фільтра від частоти.

Результати роботи можуть бути використані при проектуванні та дослідженні систем залізничної автоматики, в учбовому процесі університету в дисциплінах «Електроживлення систем автоматики», «Електричні кола і лінії залізничної автоматики», «Теорія інформації і передачі сигналів».

Ключові слова: МЕРЕЖЕВІ ФІЛЬТРИ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ, РЕЗОНАНС, КОНДУКТИВНІ ЗАВАДИ.

ЗМІСТ

Вступ	7
1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ФІЛЬТРІВ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ	9
1.1. RC фільтри	9
1.2. Фільтри типу «К»	16
1.3. Фільтри типу m	17
1.4. Фільтри Бесселя, Баттерворда, Чебишева, критичного ослаблення	21
1.5. Висновки за розділом	22
2. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЗАВАДИ В РАДІОЕЛЕКТРОННІЙ АППАРАТУРІ	23
2.1. Класифікація електромагнітних завад	23
2.2. Стандартизація електромагнітних завад	24
2.3. Методи зниження електромагнітних завад	27
3. МЕРЕЖЕВІ ФІЛЬТРИ	31
3.1. Елементи побудови мережеских фільтрів	32
3.2. Спектр завад на вході і виході фільтра імпульсного джерела живлення	34
3.3. Експериментальне дослідження проблеми виникнення кондуктивних завад в результаті роботи мережевого фільтру	38
3.4. Результати розрахунків	43
Висновки	47
Перелік посилань	48

ВСТУП

Актуальність роботи. В обладнанні, яке було спеціально розроблено для забезпечення електромагнітної сумісності, мережеві фільтри працюють разом із мережевими дротами для обмеження кондуктивних завад, ізольованих силовими модулями, до граничних значень класу А1 та ефективного захисту системи перетворення від мережі і з боку мережі, як визначено в стандарті EN 55011 [1] і категорії С2 за стандартом EN 61800 3 [2]. Мережеві фільтри підходять тільки для безпосереднього підключення до систем TN згідно EN 61000-2-4/IEC 61000-2-4 [3].

Базові мережеві фільтри для модулів призначені для зменшення кондуктивних завад в діапазоні радіопомех від 100 кГц до 10 МГц у відповідності з положеннями ЕМС. Мережевий фільтр і мережеві дроселі необхідні для досягнення цієї відповідності. Мережеві фільтри можуть використовуватися як у режимі синусоїдального потоку, так і в режимі блокуючого потоку. Використання інших фільтрів може привести до підвищення граничних значень, резонансу, перенапруги і несправності пристроїв, які підключені до мережі.

Отже тема, пов'язана із дослідженням роботи мережевих фільтрів, аналізом спектрального стану електромагнітних завад в залежності від якості монтажу є своєчасною і актуальною задачею.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження роботи мережевих фільтрів за різних умов монтажу.

Методи дослідження. Під час виконання дипломної роботи використовувалися закони з теоретичних основ електротехніки, теорії лінійних електричних кіл.

Практична значимість. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні та дослідженні систем залізничної автоматики, в учбовому процесі університету в дисциплінах «Електроживлення систем автоматики»,

«Електричні кола і лінії залізничної автоматики», «Теорія інформації і передачі сигналів».

Швидкість технічного прогресу зросла в геометричній прогресії за останні 50 років. Щодня нас оточує все більше електронних пристроїв, які мають власне електромагнітне поле, яке впливає на електромагнітне середовище сусідніх пристроїв. Вплив цих викидів на нього та їх обмеження підлягає обов'язковому контролю з боку держави. А як же вплив електромагнітних полів на людину? Ці дослідження дуже пізні. Лікарі б'ють на сполох з приводу збільшення за останні десятиліття неврологічних захворювань людини під впливом електромагнітного випромінювання. Основним завданням виробників при розробці нового обладнання та пристроїв є мінімізація випромінювання електромагнітних полів і передбачення можливих негативних наслідків. Якісна фільтрація електричного сигналу, додаткове захисне екранування обладнання та заземлення – шляхи вирішення цього завдання.

Дана наукова робота присвячена вивченню змін робочих параметрів пасивних промислових мережевих фільтрів електромагнітних перешкод Schaffner FN2010, FN2020, FN2030 за різних умов монтажу і якості заземлення.

Отже, тема дипломної роботи, яка пов'язана із дослідженням електромагнітної сумісності фільтрів низьких частот, залежністю кондуктивних завад від якості заземлення, є актуальною і своєчасною.

1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ФІЛЬТРІВ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ

Для фільтрів нижніх частот (ФНЧ) характерним є те, що вхідні сигнали низьких частот, починаючи з постійних сигналів, передаються на вихід, а сигнали високих частот затримуються.

Наведемо приклади амплітудно-частотних характеристик фільтрів нижніх частот. На рис. 1.1 показана характеристика ідеального (не реалізованого на практиці) фільтра (її іноді називають характеристикою типу «цегляна стіна»). Смука пропускання лежить у межах від нульової частоти до частоти зрізу f_c . Зазвичай частоту зрізу визначають як частоту, де величина $A(\omega)$ дорівнює 0,707 від максимального значення (тобто. менше максимального значення на 3 дБ).

1.1. RC фільтри

RC фільтр нижніх частот. Щоб створити пасивний фільтр нижніх частот, потрібно об'єднати резистивний елемент з реактивним елементом. Інакше кажучи, нам потрібна схема, що складається з резистора і або конденсатора, або котушки індуктивності. Теоретично, топологія нижніх фільтрів частот резистор-індуктивність (RL) еквівалентна, з точки зору фільтруючої здатності, топології фільтрів нижніх частот резистор-конденсатор (RC). Однак на практиці версія резистор-конденсатор зустрічається набагато частіше, і, отже, частина цієї статті буде присвячена RC фільтру нижніх частот.

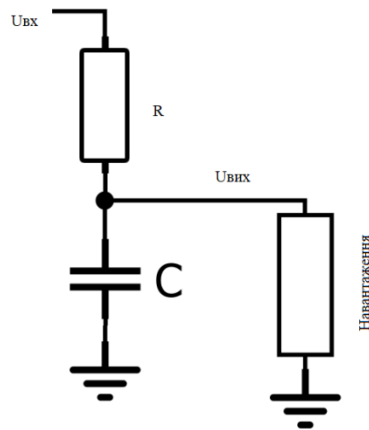


Рисунок 1.1 – RC фільтр нижніх частот

Як видно зі схеми рис.1.1 частотна характеристика RC фільтра, що пропускає нижні частоти, створюється шляхом установки резистора послідовно з шляхом проходження сигналу і конденсатора паралельно навантаженню. На схемі навантаження є окремим компонентом, але в реальному ланцюгу вона може представляти щось набагато складніше, наприклад аналого-цифровий перетворювач, підсилювач або вхідний каскад осцилографа, який ви використовуєте для вимірювання амплітудно-частотної характеристики фільтра.

Ми можемо інтуїтивно проаналізувати фільтруючу дію топології RC фільтра нижніх частот, якщо зрозуміємо, що резистор та конденсатор утворюють частотно-залежний дільник напруги (див. рис.1.1).

Коли частота вхідного сигналу низька, повний опір конденсатора буде високим щодо повного опору резистора; таким чином, велика частина вхідної напруги падає на конденсаторі (і на навантаженні, яке паралельне конденсатору). Коли вхідна частота висока, повний опір конденсатора буде низьким порівняно з повним опором резистора, що означає, що на резисторі падає більша напруга, і менша напруга передається на навантаження. Отже, низькі частоти пропускаються, а високі частоти блокуються.

Це якісне пояснення роботи RC фільтра нижніх частот є важливим першим кроком, але воно не дуже корисне, коли нам потрібно проектувати реальну схему, тому що терміни високої частоти і низької частоти надзвичайно розпливчасті. Інженери повинні створювати схеми, які пропускають та блокують певні частоти. Наприклад, в аудіосистемі, описаній вище, хочемо зберегти сигнал 5 кГц і придушити сигнал 500 кГц. Це означає, що нам потрібен фільтр, який переходить від пропускання до блокування десь між 5 кГц та 500 кГц.

Частота зрізу. Діапазон частот, для якого фільтр не викликає значного ослаблення, називається смугою пропускання, а діапазон частот, для яких фільтр викликає суттєве ослаблення, називається смугою затримування. Аналогові фільтри, такі як RC фільтр нижніх частот, переходять зі смуги пропускання у смугу затримування завжди поступово. Це означає, що неможливо ідентифікувати одну частоту, на якій фільтр припиняє пропускати сигнали і починає блокувати їх. Однак інженерам потрібен спосіб, щоб зручно та коротко охарактеризувати амплітудно-частотну характеристику фільтра, і саме тут у гру входить поняття частоти зрізу.

Коли ви подивіться графік амплітудно-частотної характеристики RC фільтра, ви помітите, що термін «частота зрізу» не дуже точний. Зображення спектра сигналу, «розрізаного» на дві половини, одна з яких зберігається, а інша відкидається, не застосовується, оскільки згасання збільшується поступово в міру того, як частоти переміщуються від значень нижче частоти зрізу до значень вище частоти зрізу.

Частота зрізу RC фільтра нижніх частот фактично є частотою, де амплітуда вхідного сигналу зменшується на 3 дБ (це значення було обрано, оскільки зменшення амплітуди на 3 дБ відповідає зниженню потужності на 50%). Таким чином, частоту зрізу також називають частотою -3 дБ, і насправді ця назва є точнішою та більш інформативною. Термін смуга пропускання відноситься до ширини смуги пропускання фільтра, і у разі

фільтра нижніх частот смуга пропускання дорівнює частоті -3 дБ (як показано на діаграмі нижче, рис.1.2). Дана діаграма показує загальні особливості амплітудно-частотної характеристики фільтра RC нижніх частот. Ширина смуги пропускання дорівнює частоті -3 дБ



Рисунок 1.2 – Діаграма амплітудно-частотної характеристики фільтра RC нижніх частот

Найбільш зручним способом оцінки впливу фільтра на сигнал є вивчення графіка його амплітудно-частотної характеристики. На цих графіках, часто званих графіками Боде, амплітуда (в децибелах) розкладається по вертикальній осі, а частота — по горизонтальній осі; горизонтальна ось зазвичай має логарифмічний масштаб, тому фізична відстань між 1 Гц і 10 Гц така ж, як фізична відстань між 10 Гц і 100 Гц, між 100 Гц і 1 кГц і так далі. Така конфігурація дозволяє нам швидко і точно оцінити поведінку фільтра в дуже широкому діапазоні частот (рис.1.3).

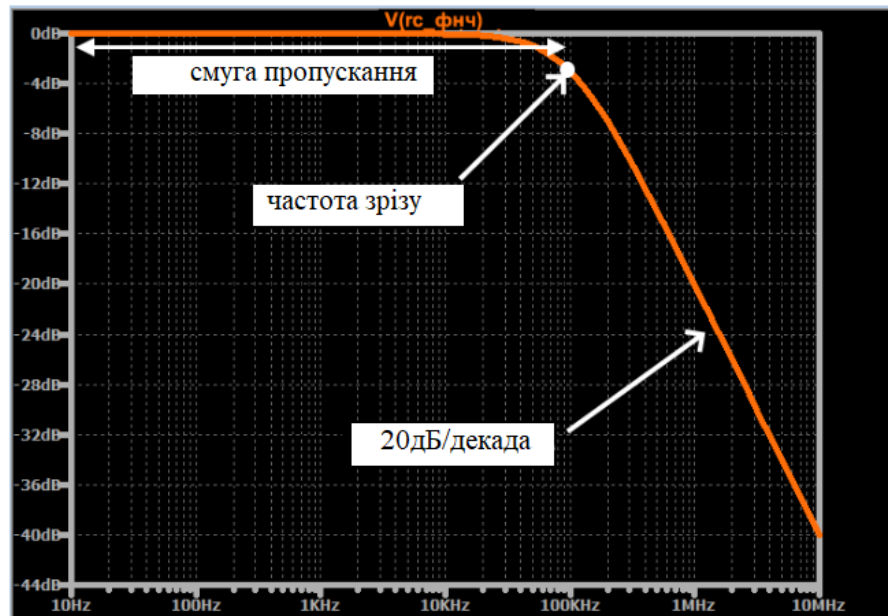


Рисунок 1.3. – Амплітудно-частотна характеристика. Діаграма Бодє RC ФНЧ

Кожна вхідна точка на кривій вказує амплітуду, яка буде мати вихідний сигнал, якщо сигнал має величину 1 В і частоту, рівну відповідному значенню на горизонтальній осі. Наприклад, коли частота вхідного сигналу рівна 1 МГц, амплітуда вихідного сигналу (за умови, що амплітуда вхідного сигналу рівна 1 В) буде 0,1 В (поскольку -20 дБ відповідає зменшенню в десять разів).

Загальний вид цієї криво-амплітудно-частотної характеристики стане вам дуже знайомим, якщо ви будете проводити більше часу зі схемами фільтрів. Крива майже ідеально плоска в смузі пропускання, а потім, за мірою наближення частоти вхідного сигналу до частоти зрізу, швидкість її спаду починає збільшуватися. В кінцевому підсумку швидкість зміни задухи, звана спадом, стабілізується на рівні 20 дБ/декада, тобто рівень вихідного сигналу зменшується на 20 дБ при кожному збільшенні частоти вхідного сигналу в десять разів.

Оцінка продуктивності фільтра нижніх частот. Якщо побудувати амплітудно-частотну характеристику фільтра, то побачимо, що амплітудний

відклик на 5 кГц, по суті, рівень 0 дБ (тобто майже нулевое затухання), становить амплітудний відклик на 500 кГц. приблизно –14 дБ (що відповідає коефіцієнту передачі 0,2). Ці значення погоджуються з результатами розрахунків, які ми виповнили в попередньому розділі.

Оскільки фільтри RC завжди мають плавний перехід від смуги пропускання до смуги затримання, а затухання ніколи не досягає нескінченності, ми не можемо виробити «ідеальний» фільтр, то є фільтр, який не впливає на необхідний синусоїдний сигнал і повністю усуває шум. Замість цього у нас завжди є компроміс. Якщо ми зміщуємо частоту зрізу ближче до 5 кГц, то отримуємо більше затухання шуму, але так же і більше затухання корисного синусоїдального сигналу, який ми хочемо відправити на динаміку. Якщо ми перемістимо частоту зрізу ближче до 500 кГц, то отримаємо менше завантаження на частоті корисного сигналу, але так же і менше завантаження на частоті шуму.

Фазовий зсув фільтра низьких частот. До цих пір ми обговорювали спосіб, яким фільтр змінює амплітуду різних частотних компонентів у сигналі. Однак реактивні елементи цепи в доповненні до впливу на амплітуду завжди вносять зсув фази.

Поняття фази відноситься до значення періодичного сигналу в певний момент циклу. Таким чином, коли ми говоримо, що схема викликає зсув фази, то маємо у вигляді, що вона створює розміщення між вхідними і вихідними сигналами: вхідні і вихідні сигнали більше не починають і закінчують свої цикли в один і той же момент часу. Значення зсуву фази, наприклад, 45° або 90° , показує, яке було створено розміщення.

Кожен реактивний елемент в ціпi вводить зсув фази на 90° , але цей фазовий зсув відбувається не відразу. Фаза вихідного сигналу, так само як і амплітуда вихідного сигналу, змінюється поступово зі збільшенням частоти вхідного сигналу. У RC фільтрі нижніх частот у нас є один реактивний

елемент (конденсатор), і, значить, схема в кінцевому результаті буде приводити здвиг фази на 90° .

Як і в разі амплітудно-частотної характеристики, фазо-частотну характеристику легше всього оцінити, вилучивши графік, на якому частота на горизонтальній осі наведена в логарифмічному масштабі. Наведене нижче опис дає загальне представлення, а потім ви можете заповнити деталі, вилучивши графік.

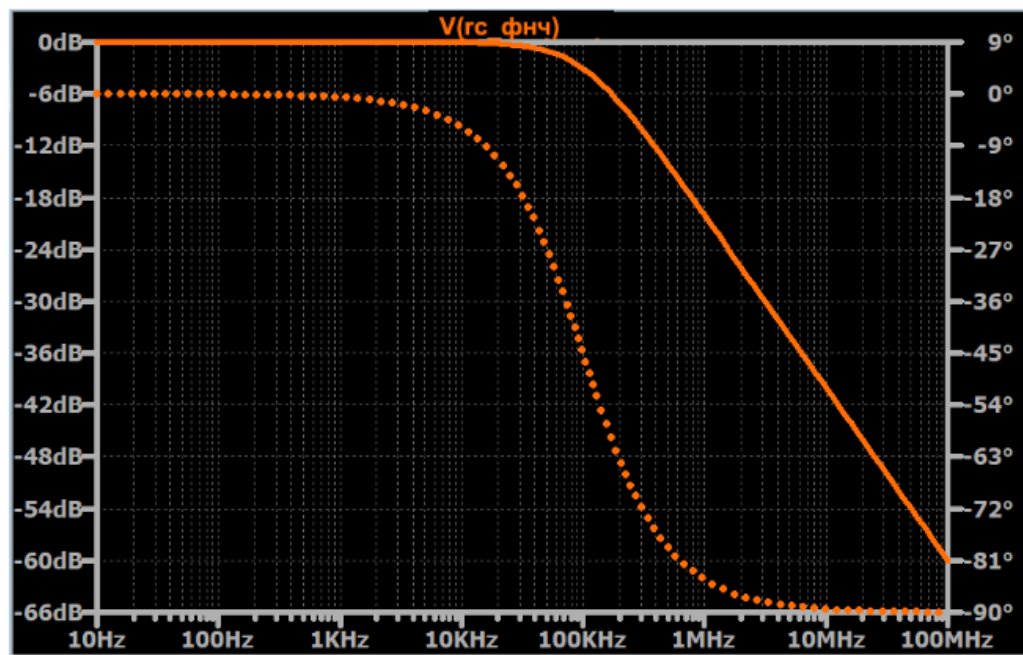


Рисунок 1.4 – АЧХ (суцільна лінія) і ФЧХ (пунктирна лінія) Загальна лінія – це амплітудно-частотна характеристика, а пунктирна лінія – це фазо-частотна характеристика. Частота зрізу становить 100 кГц. Зверніть увагу, що на частоті зрізу здвиг фази становить 45° .) фільтру низьких частот

Частота зрізу становить 100 кГц. Зверніть увагу, що на частоті зрізу здвиг фази становить 45° .

Здвиг фази має значення рівня 0° . Він поступово збільшується до досягнення 45° на частоті зрізу; на цій частині збільшується швидкість зміни характеристик. Після частоти зрізу сдвиг фази продовжує зростати, але

швидкість зміни зменшується. Швидкість зміни стає дуже малою, коли зсув фази асимптотично наближається до 90° .

1.2. Фільтри типу «К»

Розповсюдженими схемами побудови фільтрів нижніх частот (ФНЧ) типу «К» є схеми симетричних Т-подібних і П-подібних (рис. 1.5) ланок.

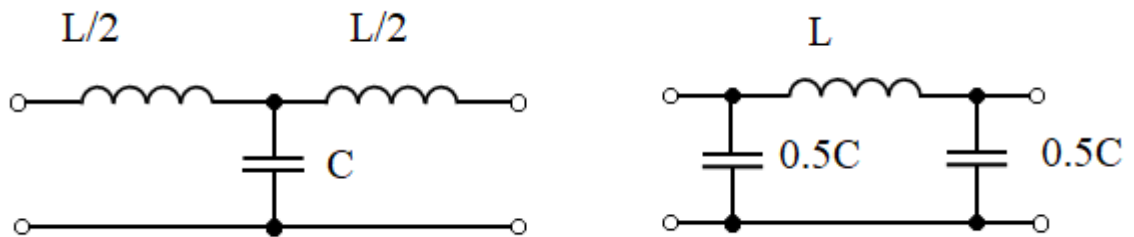


Рисунок 1.5 – Т- і П-подібні фільтри типу «К»

Кожна із зазначених схем, через свою симетрію характеризуються тільки двома власними параметрами: характеристичним опором Z_x і власною постійною передачі, $q_c = a_c + jb_c$, де a_c - власне загасання фільтра, b_c - власний коефіцієнт фази.

Для симетричних ланок фільтрів власне загасання як функція частоти визначається тільки видом фільтра (ФНЧ або ФВЧ) і не залежить від схеми його побудови (Т- подібний чи П- подібний).

Тому частоти зрізу ФНЧ, зібраних по Т- і П-подібною схемами, приведених на рис. 1.5 однакові:

$$\omega_{cp} = \frac{2}{\sqrt{LC}} \quad (1.1)$$

$$f_{cp} = \frac{\omega_{cp}}{2\pi} = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}} \quad (1.2)$$

аналогічно для:

Введемо в розгляд нормовану частоту:

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_{cp}} = \frac{f}{f_{cp}} \quad (1.3)$$

Тоді частотні залежності власних загасань ФНЧ і ФВЧ можуть бути представлені у виді:

$$\alpha_c(\text{фнч}) \begin{cases} 0, f < f_{cp} (\text{тобто } \Omega < 1) \\ 2, \text{arch}\Omega, f \geq f_{cp} (\text{тобто } \Omega \geq 1) \end{cases} \quad (1.4)$$

Характеристичний опір фільтра залежить як від його виду (ФНЧ чи ФВЧ), так і від схеми його побудови. Введемо в розгляд номінальний характеристичний опір:

$$R = \rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.5)$$

Тоді частотні залежності ХС фільтрів, зібраних по схемах, приведених на рис. 1.5 визначаються (у порядку проходження цих схем) як:

$$\begin{aligned} Z_{\text{хт фнч}}(\Omega) &= R \sqrt{1 - \Omega^2} = R \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{cp}}\right)^2}; \\ Z_{\text{хп фнч}}(\Omega) &= \frac{\rho}{\sqrt{1 - \Omega^2}} = \frac{R}{\sqrt{1 - \frac{f^2}{f_{cp}^2}}} \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$Z_{\text{хт фвч}}(\Omega) = \rho \sqrt{1 - \frac{1}{\Omega^2}}; \quad Z_{\text{хп фвч}}(\Omega) = \frac{\rho}{\sqrt{1 - \frac{1}{\Omega^2}}} \quad (1.7)$$

1.3. Фільтри типу m

В порівнянні з фільтрами типу “К” фільтри типу “m” дозволяють одержати:

1) слабку частотну залежність характеристичного опору в значній частині смуги пропускання (це поліпшує узгодження фільтра з активним частотонезалежним опором навантаження);

2) швидкий ріст власного загасання a_c аж до нескінченного значення на частоті f_∞ , при переході від смуги пропущення до смуги затримування (це покращує вибірковість фільтра). Але при віддаленні від f_∞ в глибину смуги затримування величина a_c знову знижується. Тому на практиці фільтри типу “m” нерідко входять до складу складних фільтрів, утворених шляхом каскадного погодженого включення напівланок типу “m” і ланок типу “K”. При рівності частот зрізу всіх каскадів величина складних фільтрів дорівнює сумі власних загасань цих каскадів, а також досить велика в глибині смуги затримування. Фільтри типу “m” використовуються і як самостійні вузли, наприклад фільтр Д-268 багатоканальної системи передачі К-60.

В цій роботі досліджується фільтр низьких частот (ФНЧ), та виконаний за схемою Г-подібної паралельно похідної напівланки (рис.1.6).

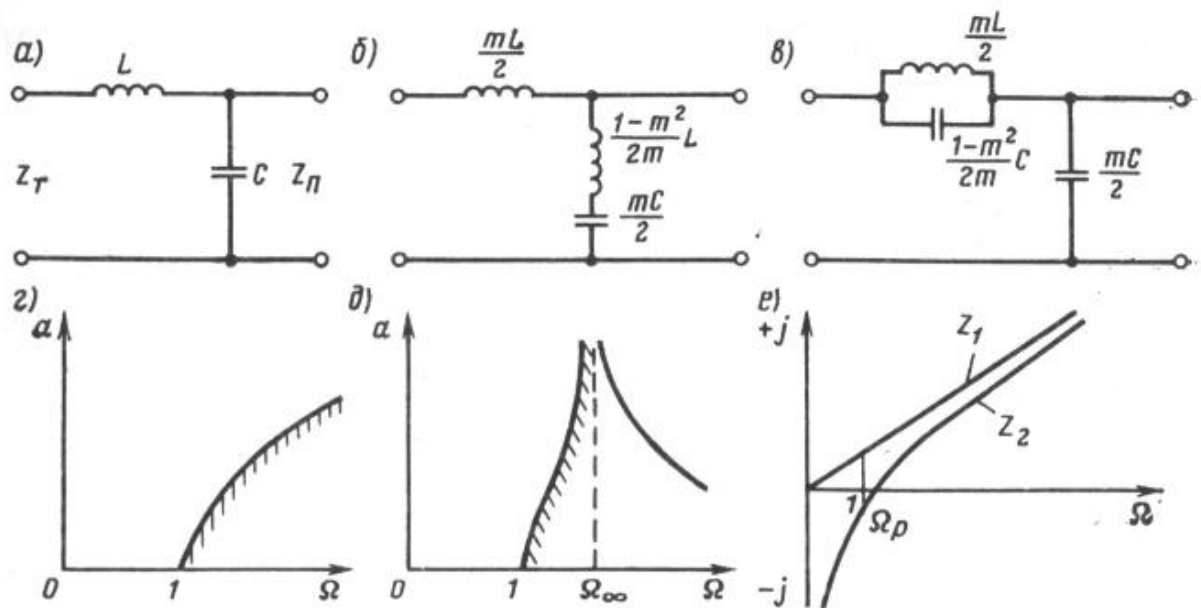


Рисунок 1.6 – Фільтри нижніх частот типу «K» (a) і П-подібна (б) і Т-подібна ланка (в) типу «m»

Параметри і характеристики цього визначаються за допомогою наступних співвідношень:

Частота нескінченного загасання

$$f_{\infty} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1.8)$$

Частота зрізу

$$f_{cp} = f_{\infty} \sqrt{1-m^2} \quad (1.9)$$

Коефіцієнт, який визначає частоту нескінченного згасання фільтру і залежить величини його параметрів, – власне згасання

$$m = \sqrt{\frac{C_2}{L_1 C_1 + C_2}}, \quad m = \sqrt{1 - \frac{1}{\Omega_{\infty}^2}}, \quad \Omega_{\infty} = \frac{f_{\infty}}{f_{cp}} \quad (1.10)$$

Залежність між частотою зрізу і частотою нескінченного згасання

$$f_{cp} = f_{\infty} \sqrt{1-m^2}, \quad (1.12)$$

$$a(f) = 0, \quad 0 \leq \Omega < 1; \quad (1.11a)$$

$$a(f) = 2 \operatorname{arch} \frac{m\Omega}{\sqrt{1-\Omega^2(1-m^2)}}; \quad 1 \leq \Omega < \frac{1}{\sqrt{1-m^2}}; \quad (1.11b)$$

$$a(f) = 2 \operatorname{arch} \frac{m\Omega}{\sqrt{\Omega^2(1-m^2)-1}}; \quad \Omega \geq \frac{1}{\sqrt{1-m^2}}; \quad (1.11b)$$

$$\text{де } \Omega - \text{нормована частота, } \Omega = \frac{\omega}{\omega_{cp}} = \frac{f}{f_{cp}}.$$

Номінальний характеристичний опір

$$R = \rho = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}}; \quad (1.12)$$

Характеристичний опір для Тm-подібної схеми

$$\underline{Z}_{\text{хтм}}(f) = \rho \frac{\sqrt{1-\Omega^2}}{1-\Omega^2(1-m^2)} = R \frac{\sqrt{1-\frac{f^2}{f_{\text{cp}}^2}}}{1-\frac{f^2}{f_{\text{cp}}^2}(1-m^2)} \quad (1.13)$$

Характеристичний опір для Пт-подібної схеми

$$Z_{\text{Пт}}(f) = R \frac{1}{\sqrt{1-\Omega^2}} (1-\Omega^2(1-m^2)) = \frac{R}{\sqrt{1-\frac{f^2}{f_{\text{cp}}^2}}} (1-\frac{f^2}{f_{\text{cp}}^2}(1-m^2))$$

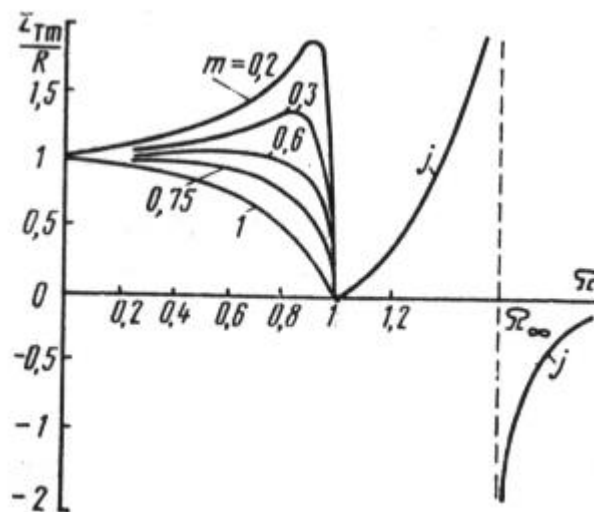


Рисунок 1.7 – Залежність характеристичного опору від частоти Т-подібної ланки фільтру низьких частот типу m

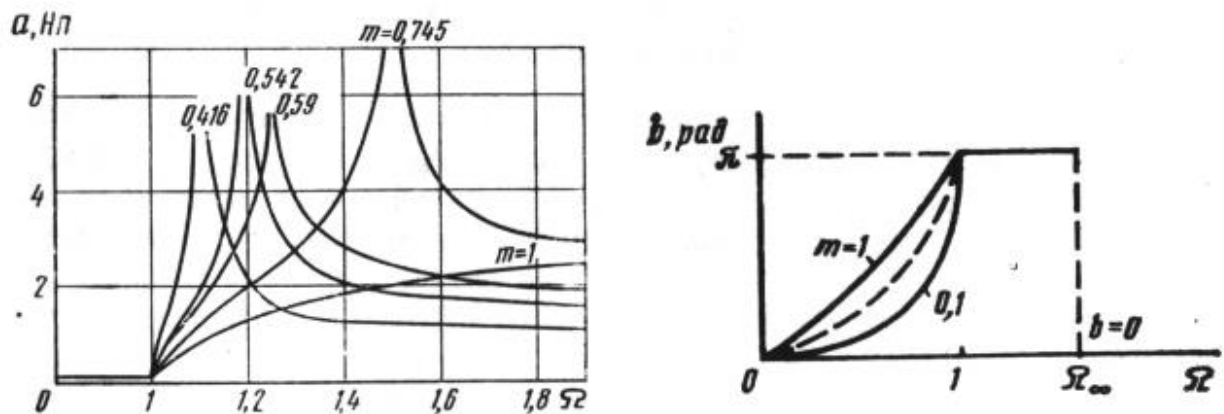


Рисунок 1.9 – Залежність згасання фільтру типу m від частоти

1.4. Фільтри Бесселя, Баттерворда, Чебишева, критичного ослаблення

Залежно від полінома, яким апроксимуються фільтри, їх можна поділити на фільтри критичного ослаблення, Бесселя, Баттерворта, Чебишева. Визначаючи принцип побудови функцій апроксимації фільтра за основи зазвичай використовується фільтри низьких частот. На рис. 1.10 показує частотну реакцію зазначених фільтрів нижчої частоти [5].

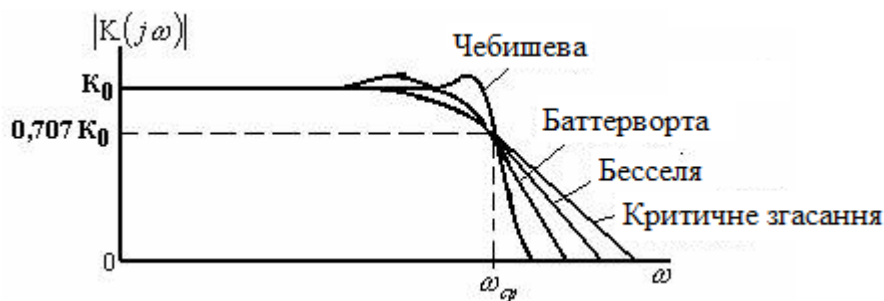


Рисунок 1.10 – Залежність згасання фільтрів Чебишева, Баттерворта, Бесселя від частоти

АЧХ ФНЧ Баттерворта має досить довгу горизонтальну секцію і різко спадає за частотою зрізу. Перехід, характерний для такого фільтра із ступінчастим вхідним сигналом, є коливанням. Зі збільшенням порядку полінома фільтра коливання сигналу посилюється.

Характеристика фільтра Чебишева спадає крутіше за частотою зрізу. У смузі пропускання вона має хвилеподібний характер із постійною амплітудою. Коливання перехідного процесу при ступінчастому вхідному сигналі сильніше, ніж фільтр Баттерворта.

Фільтр Бесселя характеризується меншою довжиною горизонтальної ділянки, ніж фільтр Баттерворта і пологішим спадом АЧХ за частотою зрізу,

ніж фільтри Баттерворта та Чебишева. Даний фільтр має оптимальну перехідну характеристику (перехідний процес практично не має коливань).

Фільтр критичного згасання має значно гіршу амплітудно-частотну характеристику порівняно з фільтром Бесселя, але не має перерегулювання. Загалом фільтр критичного згасання поступається фільтру Бесселя щодо якості відпрацювання вхідного ступінчастого сигналу [5].

1.5. Висновок за розділом

Мережеві фільтри, які пригнічують завади, являють собою фільтри низьких частот, що вільно пропускають напругу мережі (корисний сигнал) і фільтрують високочастотні складові, що містяться в мережі (гармонічні, у тому числі, і утворюють спектр імпульсних перешкод). Застосування мережевих ФНЧ має дві мети: по-перше, захист пристрою від перешкод, що надходять з мережі живлення, і, по-друге, зниження рівня емісії можливої перешкоди, що походить від приладу по проводах живлення.

Але під час роботи мережевих фільтрів виникають кондуктивні завади в діапазоні від 30 кГц до 100 МГц і навіть до 1 ГГц, що заважає роботі радіоелектронній апаратурі., в тому числі і залізничним системам зв'язку.

В даний час питання електромагнітної сумісності радіоелектронної апаратури стає все більш актуальним. Вимоги до якості електроенергії у нашому столітті набагато вищі, ніж у минулому. Під якістю електричної енергії розуміють сукупність характеристик рівня перешкод, які викликають відхилення напруги, частоти та форми кривої напруги синусоїдальної від встановлених значень.

2. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЗАВАДИ В РАДІОЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ

2.1. Класифікація електромагнітних завад

Види електромагнітних завад вторинних імпульсних джерел електроживлення. Низькочастотні перешкоди в електромережах найчастіше створюються роботою електромеханічного обладнання, наприклад, електродвигунів. Імпульсні джерела вторинного електроживлення (ІВЕП) створюють високочастотні електромагнітні перешкоди (ЕМП).

Високочастотні перешкоди мають велику проникаючу здатність. Найбільш чутлива до електромагнітного шуму апаратура, що відтворює, в тому числі комп'ютери. Розробнику електронної апаратури доводиться враховувати можливість існування перешкод як у мережі живлення, так і в навколишньому просторі, що викликає необхідність захищати свої електронні схеми від їх впливу. Крім того, апаратура, що розробляється сама не повинна генерувати ЕМП.

Електромагнітні перешкоди поширюються як по проводах (кондуктивні перешкоди), так і через навколишній простір (просторові перешкоди, що випромінюються). Кондуктивні перешкоди можна розділити на дві складові: синфазні (common-mode) та диференціальні (differential-mode). Синфазні перешкоди проходять лініями електроживлення і пов'язані із заземленням. Вони вимірюються між двома проводами лінії. Диференціальні перешкоди вимірюються між одним із проводів та землею.

Класифікація завад, які були дослідженні під час виконання дипломної роботи дано на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Класифікація височастотних електромагнітних завад, які утворюються в результаті роботи мережевих фільтрів

2.2. Стандартизація електромагнітних завад

Виробники електронного обладнання, призначеного для продажу на ринку країн Європейського Союзу, мають виконувати стандарт електромагнітної сумісності EN55022. Стандарт запроваджено зі змінами 01.10.2009р. Будь-які електронні апарати, які розміщуватимуться на ринку ЄС, повинні бути перевірені на відповідність стандарту EN55022. При проходженні процедури на відповідність до права нанесення маркування РЄ на будь-якому електронному виробі, необхідні дослідження на завадостійкість та електромагнітну емісію, які регулюють стандарти - норми викидів регулюється EN55022 та імунітет регулюється стандартом EN55024.

На американському ринку в галузі електронного обладнання застосовується стандарт FCC (Федеральна Комісія зі зв'язку) розділ 15, підрозділ J.

Вимоги німецького стандарту VDE0871 за рівнем кондуктивних перешкод електромережі тривалий час були найжорсткішими. Для виконання

вимог Європейського Союзу в Німеччині було ухвалено національний стандарт VDE0878, еквівалентний EN55022.

Допустимі рівні спектру кондуктивних завад в електромережі для обладнання класів А та Б в діапазоні частот від 10 кГц до 30 МГц згідно стандартам EN55022, VDE0871, FCC дано на рис. 2.2.

Міжнародний стандарт EN 55022:2010 застосовується до будь-якого електрообладнання або пристроїв, що працюють з номінальною напругою живлення, що не перевищує 600 В та основною функцією яких є запис, зберігання, відображення, пошук, передача, обробка, комутація або керування даними, а також обладнання, яке може бути використане в комбінації з одним або більше портами-терміналами, основною функцією яких є передача інформації. Стандарт EN 55022:2010 не поширюється на обладнання або пристрої, основною функцією яких є передача або прийом радіосигналів.

Допустимі рівні спектру кондуктивних завад в електромережі для обладнання класів А та Б в діапазоні частот від 10 кГц до 30 МГц згідно стандартам EN55022 розповсюджується на два види радіоелектронного обладнання:

- Промислове обладнання - (Клас А/Class A) - може використовуватися лише у промислових чи інших спеціальних зонах;
- Побутове обладнання - (Клас Б/Class B) - може використовуватися в житлових, офісних та інших подібних приміщеннях.

Стандарт EN55022 не регламентує рівень перешкод у частотному діапазоні до 150кГц.

Для діапазону частот 150кГц – 30МГц для обладнання класу А нормативи EN55022 та VDE0871 збігаються.

Стандарт FCC обмежує рівні ЕМП на частотах 450кГц – 30МГц на нижчому рівні.

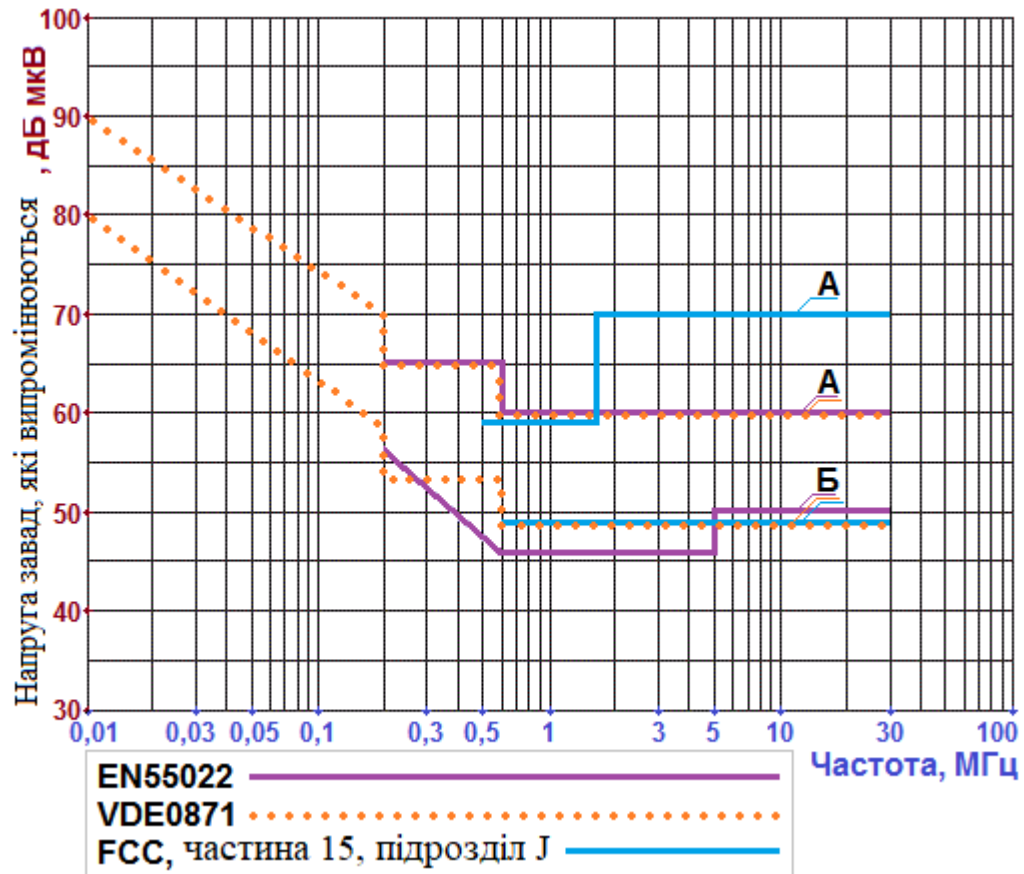


Рисунок 2.2 – Допустимі рівні спектру кондуктивних завад в електромережі для обладнання класів А та Б в діапазоні частот від 10 кГц до 30 МГц згідно стандартам EN55022, VDE0871, FCC

На відміну від двох інших стандартів, стандарт VDE0871 обмежує рівні перешкод, що розповсюджуються, ще й в діапазоні частот від 10кГц до 150кГц.

Порівняння обмежень рівнів ЕМП, що випромінюються, для різних стандартів досить складно, оскільки норми стандартів EN55022, VDE0871, FCC задаються для різних відстаней від точки вимірювання до джерела випромінювання.

Зазвичай, для ПВЕП малої та середньої потужності (до 300 Вт або працюючих зі струмами до 10 А) у складі апаратури, питання дотримання норм випромінювання ЕМП вирішується за допомогою екранування. Блок

живлення укладають в металевий корпус усередині металізованого або металевого корпусу апарату, що живиться.

2.3. Методи зниження електромагнітних завад

Основні методи зниження рівня електромагнітних перешкод

- Застосування екранів як корпусів електронних приладів.
- Екранування окремих вузлів апаратури.
- Правильна побудова електронних схем для зниження паразитних параметрів.
- Застосування завадопригнічуючих фільтрів (ППФ).

Трансформатор закритий захисним екраном з металевій фольгіметалічний корпус апарату служить екраном для електромагнітних завад Екранування перешкоджає поширенню випромінюваних електромагніт.

Корпус апарату повинен бути електромагнітним екраном для шуму, випромінюваного окремими вузлами і перешкоджати проникненню ЕМП з навколишнього простору в апарат.

У конструкції корпусу слід використовувати магнітні матеріали на залізній основі. Для пластикових корпусів є асортимент фарб, які можна використовувати для екранування корпусу від електромагнітних перешкод.

Екранування окремих вузлів апаратури дозволяє знизити перешкоди, що випромінюються окремими вузлами.

Прикладом може бути трансформатор або дросель із сердечником, що має повітряний зазор. Такий моточний вузол створює інтенсивне електромагнітне поле, що впливає сусідні компоненти перетворювача. Проблему можна вирішити за допомогою екрана, виготовленого з мідної фольги. Подібний екран може бути використаний у силовому трансформаторі перетворювача. Екран з'єднують із загальною точкою на стороні первинної або вторинної обмоток.

В імпульсних джерелах із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) існує кілька основних джерел електромагнітних завад. Основним джерелом шуму є вхідна схема живлення. Вона містить високочастотний ключ, первинну обмотку трансформатора та конденсатор вхідного фільтра. Конденсатор вхідного фільтра забезпечує імпульси струму трапецеїдальної форми, необхідні джерелу живлення. Іншим джерелом шуму є доріжки друкованої плати, де розташовані компоненти перетворювача. Доріжки повинні бути максимально короткими та широкими. Широкі доріжки мають меншу індуктивність, ніж тонкі. Довжина доріжок обумовлює частоти ЕМП, що випромінюються в навколишній простір. Для того щоб зменшити довжину з'єднань, конденсатор вхідного фільтра та ключ повинні розташовуватися поряд із трансформатором. Крім того, використовувані конденсатори повинні мати малі значення еквівалентного послідовного опору та еквівалентної послідовної індуктивності. Чим більше значення цих паразитних параметрів, тим більшими будуть кондуктивні синфазні перешкоди на вході джерела живлення (рис.2.3, 2.4).

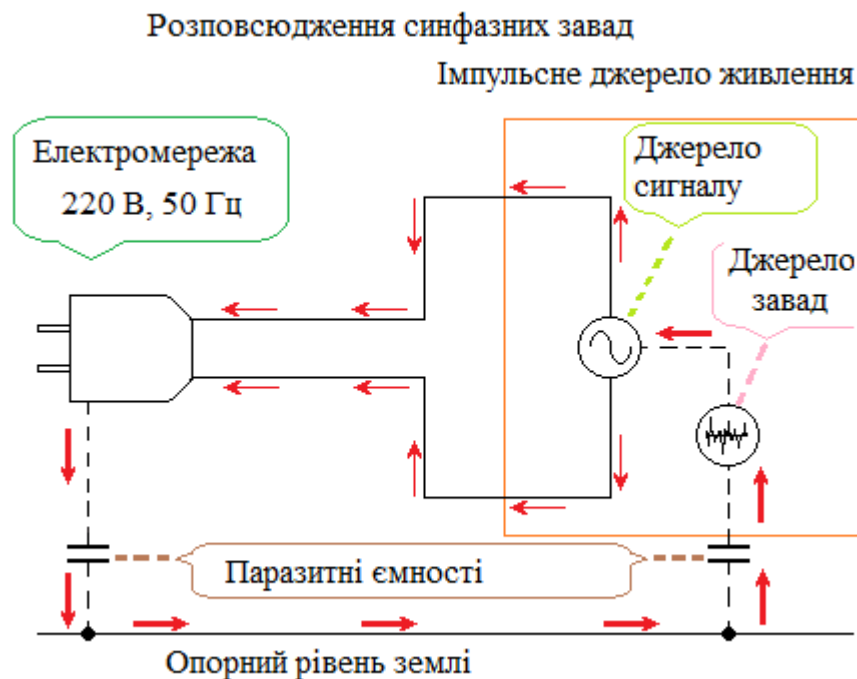


Рисунок 2.3 – Шляхи протікання синфазних електромагнітних завад

Розповсюдження диференційних завад

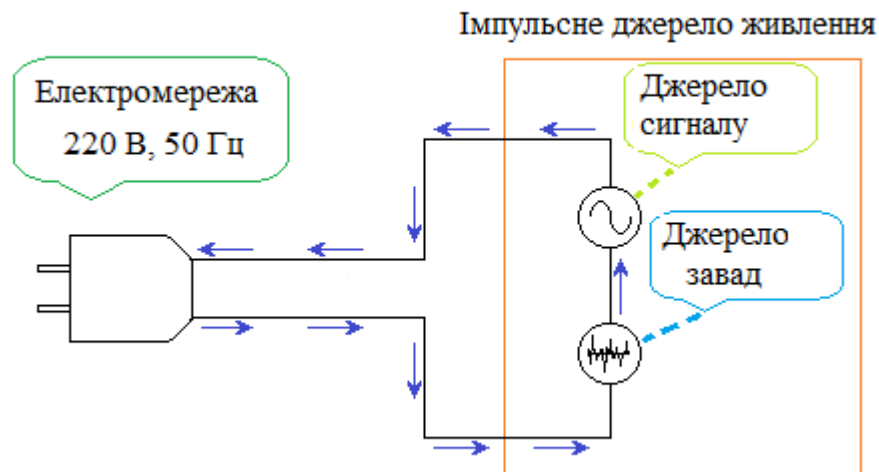


Рисунок 2.4 – Шляхи протікання диференційних електромагнітних завад

Напрямки протекання струмів синфазної та диференційної завади показано на рис. 2.3, 2.4. Джерела вторинного живлення електронної апаратури є перетворювачами електричної енергії і мають забезпечувати параметри, необхідні споживачеві. Робота імпульсних джерел електроживлення повинна бути узгоджена з характеристиками мережі живлення та задовольняти великій кількості вимог, у тому числі пов'язаних зі зміною режимів роботи як мережі, так і навантаження.

Імпульсні джерела вторинного живлення є джерелами інтенсивних електромагнітних перешкод (ЕМП), т.к. сигнали імпульсних джерел представляють періодичну послідовність імпульсів. Спектри таких сигналів займають діапазон частот завширшки до кількох мегагерц. Також ІВЕП самі досить сприйнятливі до впливу зовнішніх високочастотних перешкод. У зв'язку з цим виникає необхідність як захищати імпульсні перетворювачі від зовнішніх кондуктивних перешкод, що проникають через мережевий кабель, так і придушувати перешкоди, які генеруються апаратом і наводяться в мережу живлення.

Струм синфазної перешкоди (common-mode) протікає по всіх лініях в одному напрямку (рис.2.3). Синфазні перешкоди називають ще асиметричними. Сигнал синфазної перешкоди вимірюється між корпусом приладу (заземленням) та будь-яким з'єднувальним провідником (в т.ч. шиною живлення) апарату.

Струм диференціальної перешкоди (differential-mode - "across-the-line") (рис.2.4), наведений на обидва дроти лінії живлення, протікає по них у протилежних напрямках. Диференціальні перешкоди також називають симетричними. Сигнал диференціальної перешкоди вимірюється між двома сполучними провідниками, або сигнальним провідником та загальним полюсом, або між двома шинами живлення.

Розробники електронної апаратури повинні виконувати нормативи, що визначають допустимі рівні промислових перешкод. Цей фактор викликає вимогу використати спеціальні фільтри для придушення високочастотних електромагнітних перешкод. Такі фільтри називають мережевими. Їх встановлюють між зовнішньою мережею та ІВЕП. Фільтри захисту від радіоперешкод встановлюються у вхідному та вихідному ланцюгах перетворювача. Такий фільтр має пригнічувати як диференціальну, так і синфазну складові ЕМП.

3. МЕРЕЖЕВІ ФІЛЬТРИ

Мережеві фільтри, які пригнічують завади, являють собою фільтри низьких частот, що вільно пропускають напругу мережі (корисний сигнал) і фільтрують високочастотні складові, що містяться в мережі (гармонічні, у тому числі, і утворюють спектр імпульсних перешкод). Їх застосування має дві мети: по-перше, захист пристрою від перешкод, що надходять з мережі живлення, і, по-друге, зниження рівня емісії можливої перешкоди, що походить від приладу по проводах живлення. Поздовжній елемент фільтра вибирається з урахуванням споживаного струму. Хоча зазвичай значення повного опору джерела та приймача перешкод невідоме, часто можна прийняти опір з боку мережі малим, а з боку навантаження – великим. У зв'язку з цим для захисту приладів від перешкод мережі домінують фільтри [6-10].

Мережевий фільтр ЕМП пропонується розмістити в додатковому металевому боксі. Створюючи різні умови контакту між мережевим фільтром електромагнітних перешкод у металевому корпусі та додатковою металевою коробкою, відгук лінійного фільтра електромагнітних перешкод можна досліджувати в діапазоні частот від 10 кГц до 100 МГц [6 -13]. Етапи випробувань залежно від якості контакту між корпусом мережевого фільтра та додатковим металевим боксом:

Виміри виконувались згідно проекту на кафедрі силової електроніки і електромагнітної сумісності Університету Твенте за проектом ETUT, який фінансується програмою досліджень та інновацій «Горизонт 2020» Європейського Союзу в рамках грантової угоди Марії Склодовської Кюрі № 955646 [11-13].

3.1. Елементи побудови мережевих фільтрів

Мережеві фільтри повинні послаблювати коливання високої частоти та пропускати без послаблення коливання низької (промислової) частоти. Тому їх реалізують з урахуванням фільтрів нижніх частот (ФНЧ). Перешкодні фільтри реалізують шляхом каскадного з'єднання Г-подібних або Т-подібних ланок. Комбінуючи такі ланки, досягають потрібного рівня згасання. Структура фільтра визначається багато в чому внутрішнім опором джерела перешкод, опором мережі та видом перешкод. На рис. 3.1 показано типову схему дволанкового фільтра, що забезпечує придушення синфазних і диференціальних перешкод.

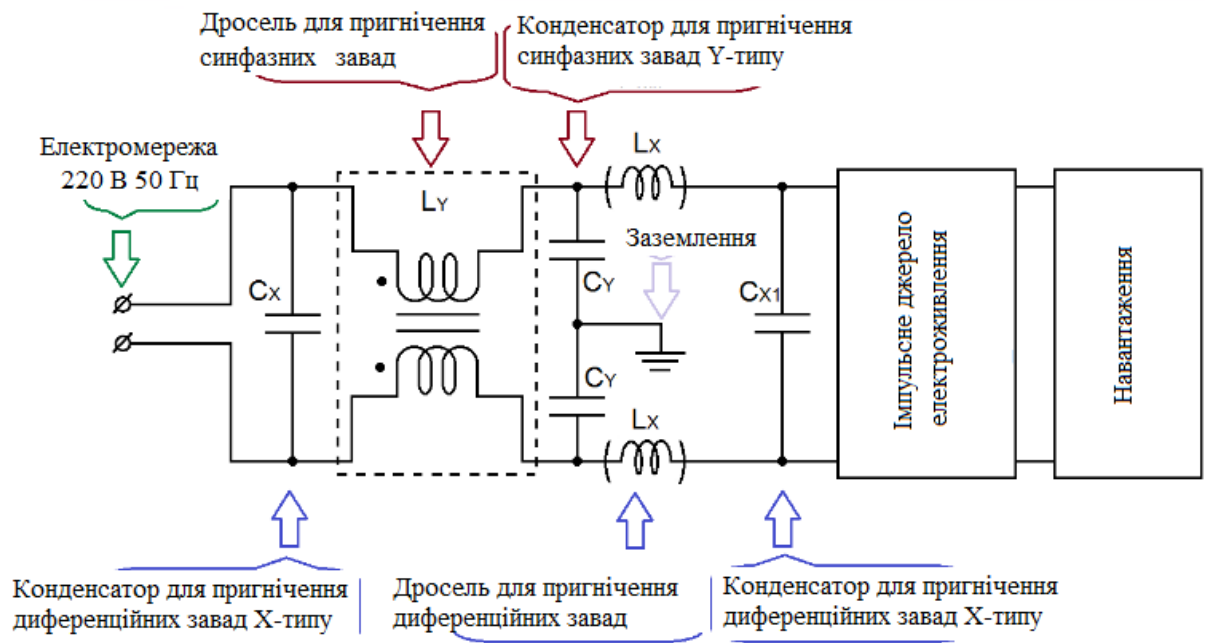


Рисунок 3.1 – Індуктивно-ємнісний завадопригнічуючий фільтр на вході джерела вторинного електроживлення

Основні властивості конденсаторів типу X і Y.

- Конденсатори типу X встановлюють між лініями (назва походить від англійського терміна across-the-line). До них пред'являються високі вимоги

щодо безпеки. Вони повинні витримувати максимально можливі в мережі сплески напруги, не загорятися і не повинні підтримувати горіння.

- Конденсатори типу Y призначені для роботи в тих місцях, де їх вихід з ладу загрожує життю людей. Такі конденсатори мають підвищену електричну і механічну міцність.

В нашій країні використовують конденсатори типів X1 та X2, Y1 та Y2.

- Збільшення ємності конденсатора CX покращує фільтрацію диференціальних перешкод, але призводить до збільшення реактивного струму.

- Збільшення ємності конденсатора CY покращує фільтрацію синфазних перешкод, але збільшує струм витоку.

- Збільшення індуктивності дроселів покращує фільтрацію, але призводить до збільшення активного опору обмоток.

Тому при проектуванні мережного фільтра важливо дотримуватися певного балансу між величиною номіналів компонентів пристрою.

Як конденсатори CX CX1 слід застосовувати металопленочні конденсатори, бажано з поліпропіленовим діелектриком. Отримати інформацію про плівкові конденсатори SPKF. Ємності CY можуть бути плівковими, так і керамічними конденсаторами. Отримати інформацію про керамічні конденсатори SPKC.

Найскладнішим елементом фільтра є LY - так званий синфазний дросель, до якого пред'являються досить високі вимоги щодо стійкості до високої електричної напруги між обмотками і пропускною здатністю струму. Отримати інформацію про синфазні дроселі D2U. Отримати інформацію про синфазні дроселі D2T. В ідеалі такі дроселі повинні мати дві абсолютно однакові обмотки. Слід враховувати, що в реальних моточних виробках завжди є деякий потік розсіювання, і реальний "синфазний" дросель має деяку "диференціальну" індуктивність.

Індуктивності LX повинні витримувати великі струмові навантаження. Для їх виготовлення ефективно застосовувати або феритові сердечники із зазором, або сердечники з порошкових матеріалів із розподіленим немагнітним зазором (магнітодіелектрики). Отримати інформацію про синфазні дроселі DPT.

Далі розглядається вплив використання окремих компонентів фільтра на спектр перешкод сигналу в порівнянні з рівнем перешкод за стандартом EN55022. Імпульсні ІВЕП генерують найбільш сильні перешкоди в частотному діапазоні сотень кілогерц, найбільш близько до робочих частот імпульсних перетворювачів.

3.2. Спектр завад на вході і виході фільтра імпульсного джерела живлення

Частотний спектр синфазних і диференційних електромагнітних завад. На рис. 3.2 наведено типовий "нефільтрований" спектр сигналу перешкод імпульсного джерела живлення, який не оснащений завадопригнічуючим фільтром.

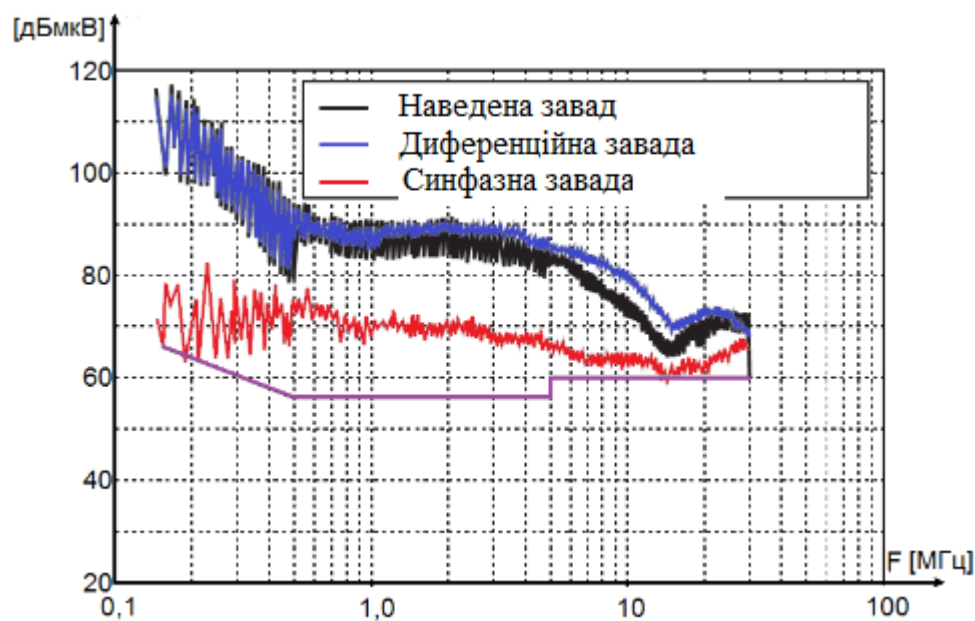


Рисунок 3.2 – Типовий "нефільтрований" спектр сигналу перешкод імпульсного джерела живлення

Помітно серйозне переважання диференціальної складової сигналу перешкод над синфазною.

- На рис.3.3 показано частотний спектр синфазних і диференційних електромагнітних завад при використанні одного конденсатора Х-типу, що фільтрує.

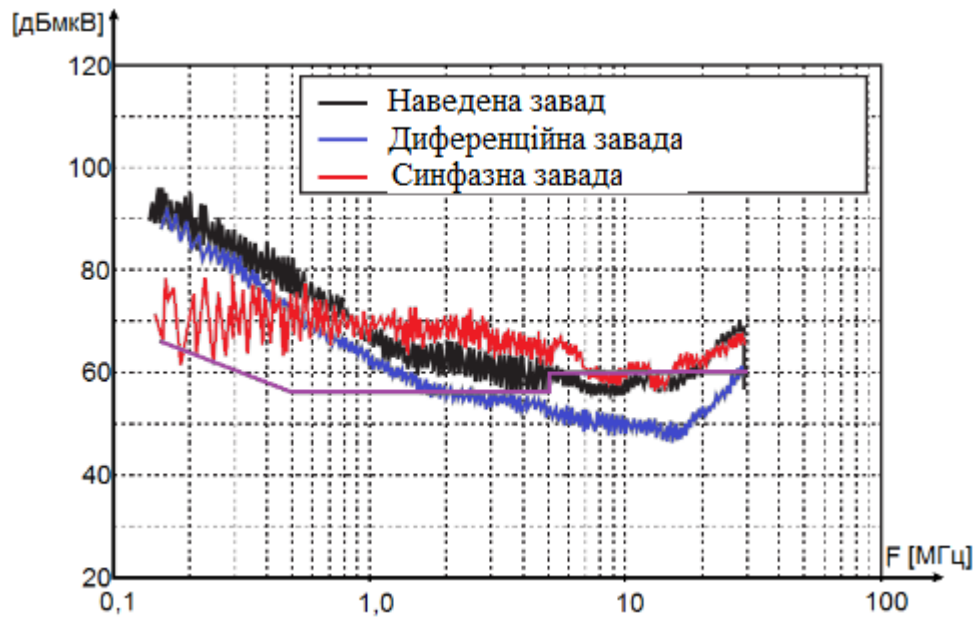


Рисунок 3.3 – Частотний спектр синфазних і диференційних електромагнітних завад при використанні одного конденсатора Х-типу

Помітно зниження рівня диференціальних перешкод та відсутність впливу на синфазний шум.

На рис.3.4 показаний спектр перешкод при спільному використанні конденсаторів Х- та Y-типів.

Спостерігається досить помітне придушення диференціальних та синфазних перешкод.

На рис.3.5 показаний спектр перешкод при використанні Х- та Y-типів конденсаторів з дроселелем для придушення синфазних перешкод.

Спостерігається серйозне зниження рівня перешкод (обох складових).

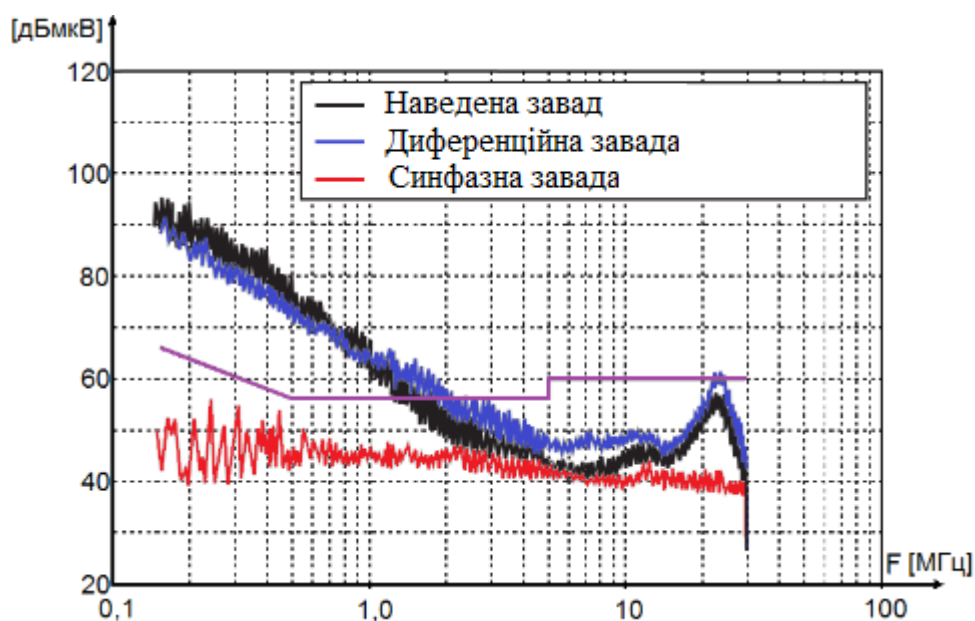


Рисунок 3.4 – Частотний спектр синфазних і диференційних електромагнітних завад при використанні конденсаторів Х- та Y-типів

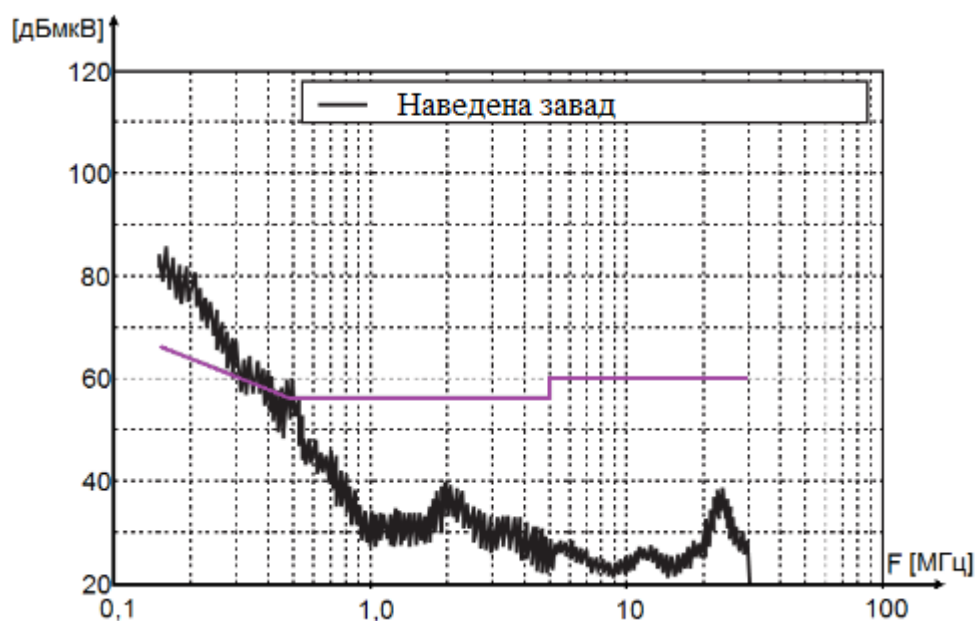


Рисунок 3.5 – Частотний спектр синфазних і диференційних електромагнітних завад при використанні конденсаторів Х- та Y-типів з дроселем для придушення синфазних перешкод

Коефіцієнт вносимого згасання

$$a = 20 \lg \left| \frac{U_1}{U_2} \right|, \quad (3.1)$$

U_1 – напруга на вході фільтра, В; U_2 – напруга на виході фільтра, В.

Іншими словами a - коефіцієнт загасання, що вноситься; U_1 – напруга перешкод за відсутності фільтра; U_2 – напруга перешкод за наявності фільтра.

Ефективність фільтрації оцінюють загасанням для сигналу перешкод.

Залежність вносимого згасання (дБ) від частоти сигналу для різних номіналів модифікацій дроселя дано на рис. 3.6.

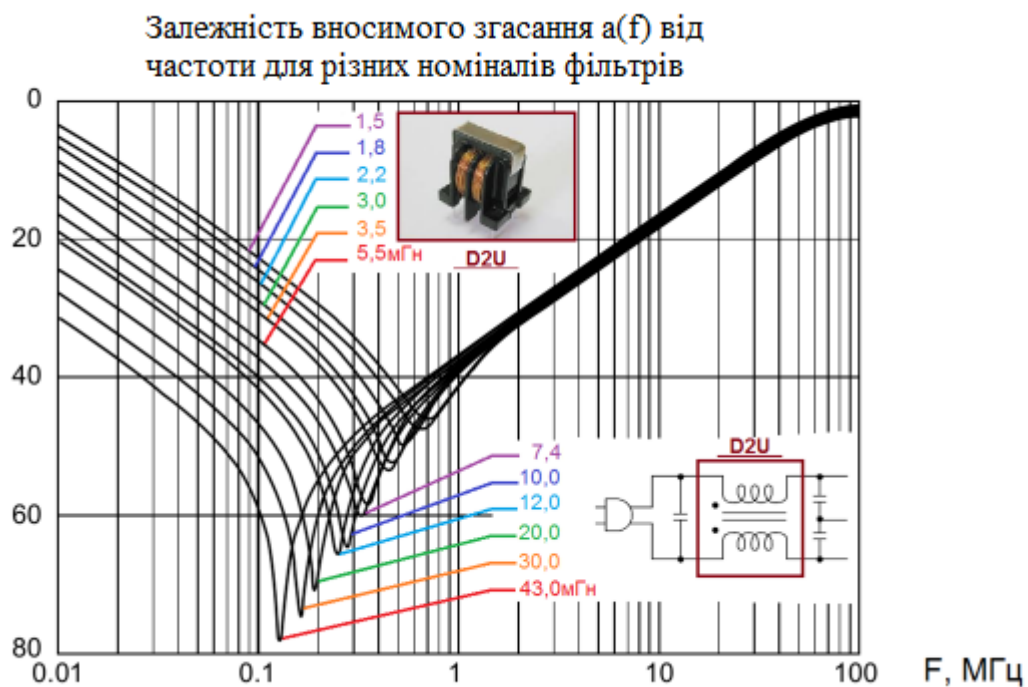


Рисунок 3.6 – Залежність вносимого коефіцієнту згасання від частоти для різних номіналів фільтра

Застосування високоефективних індуктивно-ємнісних перешкодадавляючих фільтрів дозволяє убезпечити апаратуру від шкідливого впливу зовнішніх кондуктивних перешкод і знизити вихідні шуми.

3.3. Експериментальне дослідження проблеми виникнення кондуктивних завад в результаті роботи мережевого фільтру

Розвиток сучасних технологій призводить до великої кількості джерел кондуктивних завад, а також заважають правильно функціонувати пристроям залізничної автоматики та зв'язку.

Особливо потреба в дослідженні електромагнітній сумісності фільтрів із навантаженням виникає в промисловості, де використовують силові перетворювачі частоти та інші пристрої з комутацією.

Режим блоків живлення дуже поширений. Класичний метод до запобігати негативному впливу СЕ на захищене обладнання полягає в установці пасивного фільтра низьких частот. Цей спосіб дуже привабливий простотою використання і відносною невисокою вартістю. Але для ефективної роботи фільтра необхідно переконатися, що він правильно встановлений, зокрема, що він є надійно заземлений [1]. Як показано в [2], власне монтаж промислового обладнання дозволяє значно скоротити наслідки всіх можливих перешкод у системі.

Хоча керівництво по установці фільтра прямо вказує на необхідність хорошого заземлення фільтра, це не завжди досягнуто. Однією з можливих причин цього є те, що фокус інженерної освіти, як правило, на проектуванні фільтрів, ефективності та відбору, але не з практичних питань пов'язані з установкою фільтра.

Наприклад, під час курсу ЕМС студенти вивчають практики самотійного та взаємного (між компонентами) паразитичного ефекти компонентів фільтра, як показано в демонстраціях описано в [3], а також вплив належного заземлення.

Проте під час практичного застосування [4] студенти часто стикаються з наслідками неякісного заземлення.

І ми часто спостерігаємо в реальних додатках, що інженери у промисловості недостатньо усвідомлюють необхідність належної установки фільтрів. Таким чином, існує гостра потреба в дизайні демонстраційних матеріалів для ілюстрації впливу установки на продуктивність фільтра. З цією метою, правильна установка фільтрів була описана в [5], але ця праця охоплює лише фільтри друкованих плат.

В роботі дано результати досліджень роботи мережевих фільтрів Shaffner FN 2030-10-06 для таких режимів в залежності від якості заземлення, довжини заземлюючого проводу, типу підложки (пінополіетілен, хороший контакт між корпусом фільтра і коробкою і поганий і т.д.), якості монтажу і режиму роботи: Common mode, Differential mode [11-13]. Виміри виконувались згідно [14-15]:

а) поганий контакт між корпусом мережевого фільтра та додатковою металевою коробкою, розділивши їх ізоляційним матеріалом (пінополіетиленом);

б) кращий контакт, який досягається при простому контакті корпусів фільтрів і коробки;

в) найкращий контакт, який фізично з'єднує (болтом або паянням) корпус фільтра з металевою коробкою;

г) мережевий фільтр ізолюваний пінополіетиленом з металевої коробки, заземлення виконане довгим проводом;

д) мережевий фільтр ізолюваний пінополіетиленом з металевої коробки, заземлення виконано коротким проводом;

е) розділення входу та виходу мережевого фільтра ЕМІ металевою перегородкою, яка також має хороший контакт між корпусом мережевого фільтра ЕМІ та металевою коробкою;

ж) використовуючи попередні умови, встановіть два додаткових конденсатори на виході між корпусом мережевого фільтра електромагнітних перешкод і коробкою на проводах лінії.

На рис.3.1. наведено схему фільтру

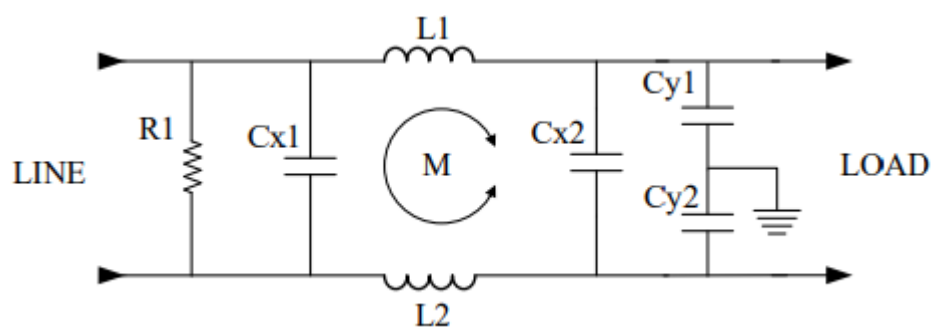


Рисунок 3.7 – Схема фільтру низьких частот Shaffner FN 2030-10-06

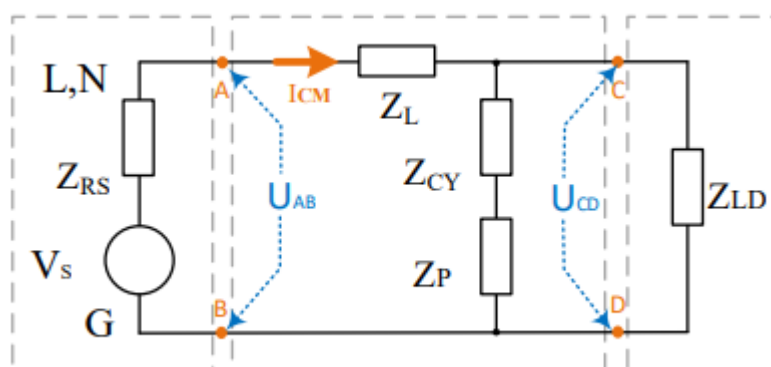


Рисунок 3.8 – Еквівалентна схему мережевого ФНЧ фільтру в режимі
COMMON MODE

Результати вимірів залежності згасання від частоти в режиму COMMON MODE мережевого фільтру дано на рис. 3.4 [13-15].

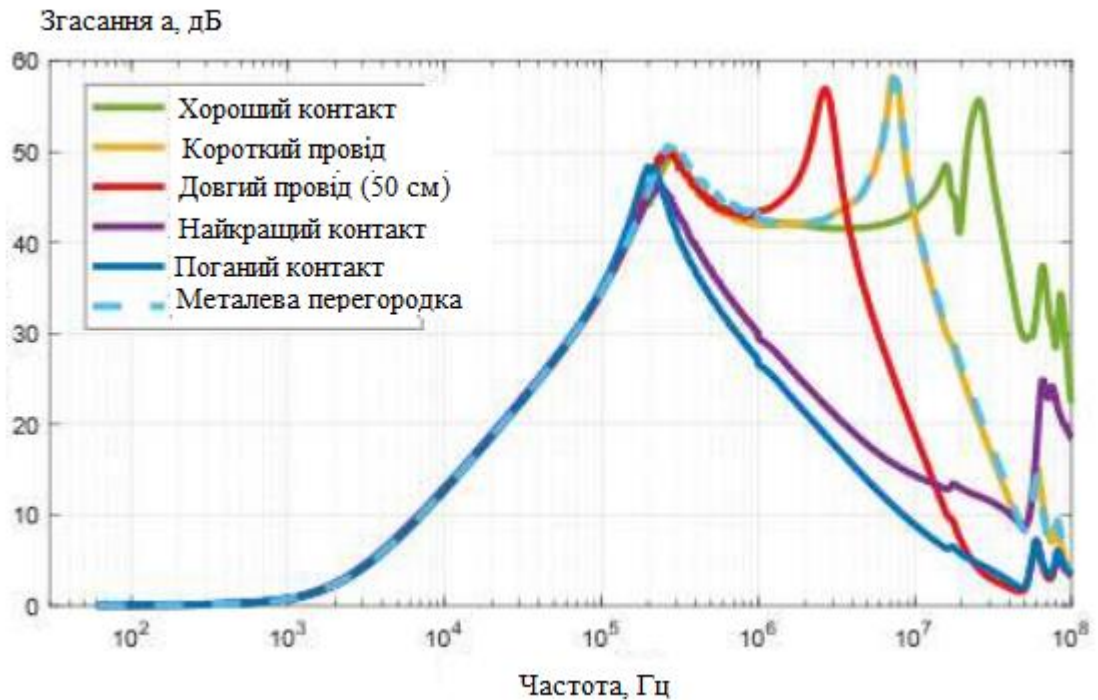


Рисунок 3.9 – Результати вимірів залежності згасання від частоти в режиму COMMON MODE мережевого фільтру

Зібрані схеми були протестовані у всіх запропонованих режими заземлення. Вимірювання ІЛ в NM, CM та DM були виконуються за процедурою випробувань, як описано в [13], за допомогою комплексу слідкуючого генератора Signal Hound TG44 [7] та аналізатор сигналів Signal Hound SA44 [10]. Блок-схема з тестові демонстрації показані на рис. 3. Результати DM не будуть зазнавати значного впливу через якість заземлення, але буде під впливом якості монтажу в цілому, і таким чином були виміряні теж.

Під час вимірювань металевий ящик повинен бути щільно закритий кришкою. Режим заземлення common mode хороше заземлення забезпечує найкраще загасання до 55 дБ в діапазоні високих частот від 10 МГц до 25 МГц, тим часом, зниження якості заземлення призводить до значного падіння значення ІЛ. Наприклад, різниця між ослабленням в різних видах

заземлення становить понад 50 дБ на частоті близько 20 МГц. Якість монтажу включає заземлення і являє собою різні умови з'єднання між шасі фільтра та опорним металевим ящиком, включаючи їх взаємну орієнтацію.

Відповідно до схеми фільтра, конденсатори CY1 і CY2 є підключений до металевого корпусу фільтра. Тому передбачається що запропоновані режими заземлення можуть бути представлені а паралельне з'єднання еквівалентного опору, ємності і індуктивності, підключеної між землею фільтра та точка підключення конденсатора.

Щоб оцінити параметри, які можуть характеризувати кожного з режимів заземлення, з якими проводились вимірювання LCR-метром. Показано результати цих вимірювань у табл. 3.1.

Наприклад, у режимі BD паралельний металевій поверхні (шасі фільтра та металева коробка) ізолювані від кожної іншої і можуть бути представлені як паразитна ємність 20 пФ. Просто торкаючись цих поверхонь у режимі хорошого контакту призводить до збільшення значень паразитної ємності до 200 пФ.

Коли фільтр заземлений за допомогою довгого дроту в режимі довгий провід, його індуктивність 35 нГн додається паралельно до паразитної ємності. При використанні короткого дроту відбувається та ж ситуація, але величина паразитної індуктивності зменшується до 5 нГн.

Нарешті, якісне заземлення режиму при хорошому контакті забезпечує болтове з'єднання або зварне з'єднання з металевою коробкою і має відсутні паразитні компоненти.

Потім для перевірки виконаних вимірювань фільтра було здійснено моделювання в MathCad.

Це моделювання можна використовувати для студентів у зворотному порядку: спочатку вони повинні розробити фільтр із заданими (ідеальними) компонентами, потім вони повинні змодельовати, а потім виміряти його параметри. Тоді вони дізнаються, що багато параметрів, наприклад, паразити

та якість встановлення фільтра, повинні бути включені в симуляцію. Отже, неідеальна поведінка фільтра компоненти, такі як еквівалентний послідовний опір (ESR), еквівалентна послідовна індуктивність (L), еквівалентна паралельна опір (R) та еквівалентна паралельна ємність (C) слід враховувати. Для цього був один із фільтрів розібрали, і всі його компоненти перевірили за допомогою аналізатор опору.

Таблиця 3.1 – Величини паразитних індуктивностей і ємностей в різних режимах роботи фільтра і різному якості заземлення

Елемент	Поганий контакт	Довгий провід заземлення (50 см)	Короткий провід заземлення (10 см)	Найкращий контакт	Хороший контакт/ Металеве роз'єднання
L	20 пФ	20 пФ	20 пФ	200 пФ	
C					
R		25 нГн	5 нГн		

3.4. Результати розрахунків

Перевіримо за допомогою MathCad чи впливають знайдені паразитні індуктивності, ємності на величину частоту зрізу і характеристичний опір фільтру. Виконані дослідження показали, що в діапазоні до 100 кГц паразитні індуктивності і ємності не впливають значно на фільтр низьких частот.

1. Дослідження однієї Г-подібної ланки

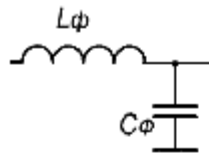


Рис 3.5. Схема Г-подібної ланки мережевого фільтру

$$L := 8 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad L = 8 \times 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$C := 0.47 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

Частота зрізу

$$fz1 := \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad fz1 = 5.191 \times 10^3 \text{ Гц}$$

$$Lf := L \cdot (L + 10 \cdot 10^{-9}) \cdot (L + 50 \cdot 10^{-9})$$

$$fz1(Lf) := \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{Lf \cdot C}}$$

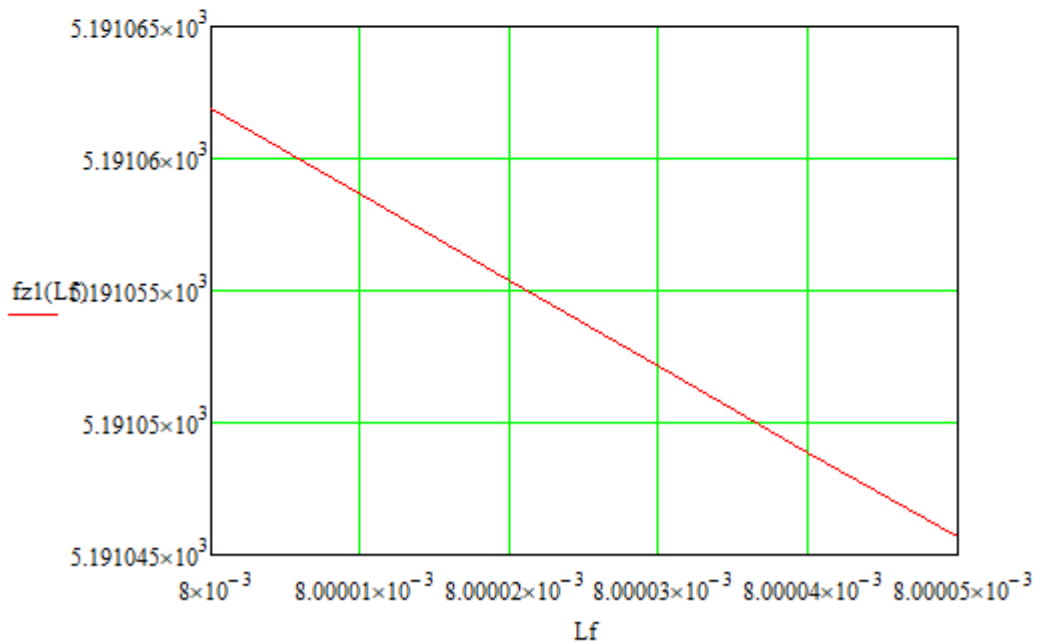


Рис 3.6. Залежність частоти зрізу від величини індуктивності фільтру з урахування паразитної індуктивності

$$R1(Lf) := \sqrt{\frac{Lf}{C}}$$

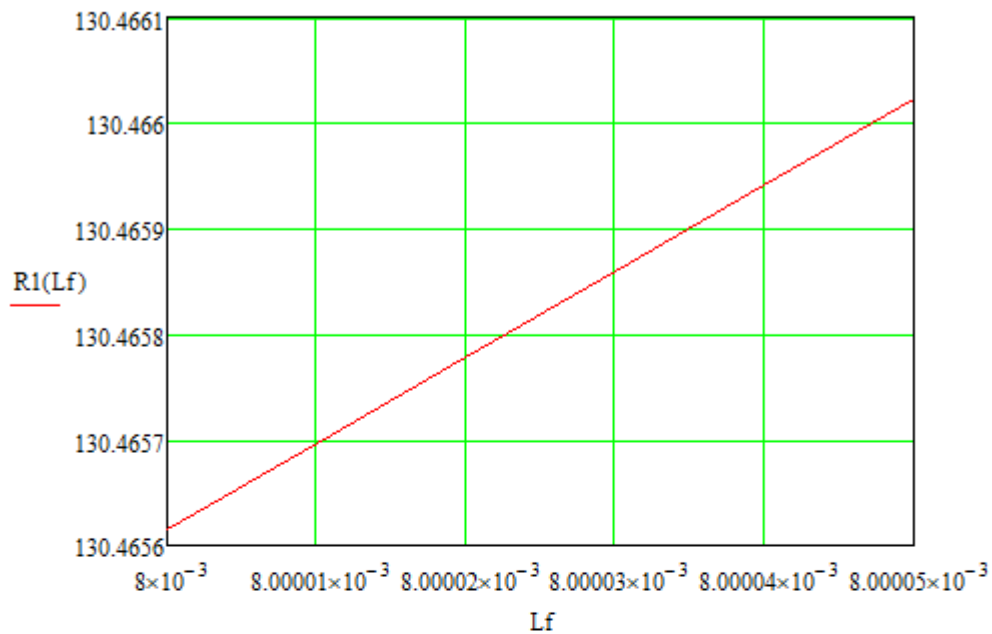


Рис 3.7. Залежність характеристичного опору фільтру від величини індуктивності з урахуванням паразитної індуктивності

Якщо враховувати паразитні індуктивності і ємності, які виникають в різних режимах заземлення і при різній якості монтажу, отримаємо такі залежності характеристичного опору від частоти і згасання від частоти

$$L1 := 8 \cdot 10^{-3} \quad \Gamma_H$$

$$L2 := 8 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-9} \quad \Gamma_H$$

$$L3 := 8 \cdot 10^{-3} + 50 \cdot 10^{-9} \quad \Gamma_H$$

$$C1 := 0.47 \cdot 10^{-6} \quad \Phi$$

$$C2 := 0.47 \cdot 10^{-6} + 20 \cdot 10^{-12} \quad \Phi$$

$$C3 := 0.47 \cdot 10^{-6} + 200 \cdot 10^{-12} \quad \Phi$$

Характеристичний опір однієї Г-подібної ланки

$$R1 := \sqrt{\frac{L1}{C1}}$$

$$R2 := \sqrt{\frac{L2}{C2}}$$

$$R3 := \sqrt{\frac{L3}{C3}}$$

$$R1 = 130.466 \text{ Ом}$$

$$R2 = 130.463 \text{ Ом}$$

$$R3 = 130.438 \text{ Ом}$$

Частота зрізу

$$f_{z1} := \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{L1 \cdot C1}} \quad f_{z1} = 5.191 \times 10^3 \text{ Гц}$$

$$f_{z3} := \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{L3 \cdot C3}} \quad f_{z3} = 5.19 \times 10^3 \text{ Гц}$$

$$f_{z2} := \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{L2 \cdot C2}} \quad f_{z2} = 5.191 \times 10^3 \text{ Гц}$$

$$f := 0..100000 \text{ Гц}$$

$$Z1(f) := R1 \cdot \sqrt{1 - \frac{f^2}{f_{z1}^2}} \quad Z2(f) := R2 \cdot \sqrt{1 - \frac{f^2}{f_{z2}^2}} \quad Z3(f) := R3 \cdot \sqrt{1 - \frac{f^2}{f_{z3}^2}}$$

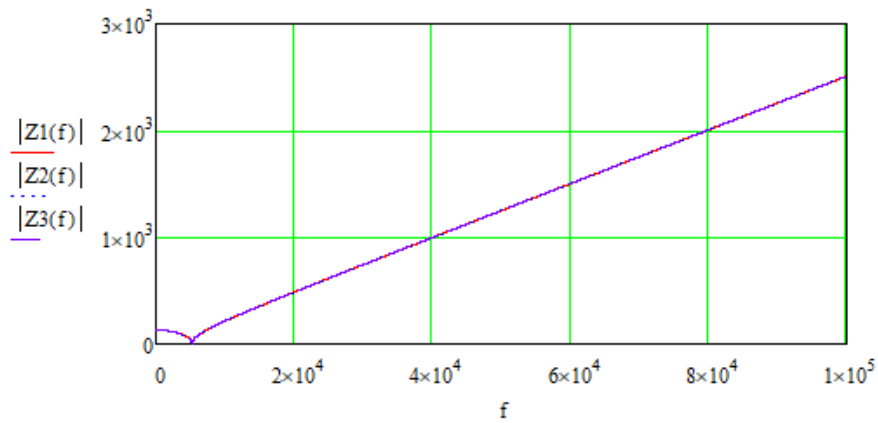


Рис 3.8 Залежність опору фільтру від частоти

$$a1(f) := 2 \cdot \operatorname{acosh}\left(\frac{f}{f_{z1}}\right) \quad a2(f) := 2 \cdot \operatorname{acosh}\left(\frac{f}{f_{z2}}\right) \quad a3(f) := 2 \cdot \operatorname{acosh}\left(\frac{f}{f_{z3}}\right)$$

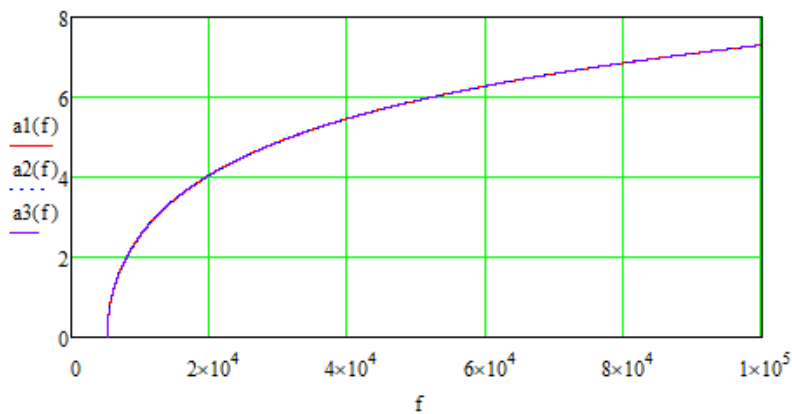


Рис 3.9 Залежність згасання фільтру від частоти

ВИСНОВКИ

В результаті вимірювань було встановлено, що для випробувань мережевих фільтрів з хорошим електричним зв'язком металу з корпусом фільтра виникає додаткова завада з додатковою коробкою, тобто заземлена, перевірена структура має більший ефект загасання в діапазоні частот від 60 Гц до 100 МГц. В деякій частині спектра, загасання досягає від 10 дБ до 60 дБ (тобто різниця 50 дБ). Для тестів b і c, використовуючи а короткий заземлюючий дріт, продуктивність покращується на 10 дБ. Для тесту f Рис. 1. (жовта та синя графічна лінія, експеримент e і f), вхід і вихід мережевого фільтра розділені металевою перегородкою, яка також має хороші контакт між корпусом мережевого фільтра та металевою коробкою, ніякої різниці в вимірюваннях не спостерігалось. Це наводить на думку щоб добре заземлити корпус фільтра досягнення найкращого рівня захисту від зовнішнього впливу електромагнітні перешкоди.

Мета виконаної роботи — проілюструвати вплив якості заземлення для ЕМІ-фільтрів. Використання погане, краще і використовується хороше заземлення з короткими та довгими проводами та прикручений фільтр. Встановлені електромагнітні завади і резонансні частоти фільтрів. Також виконані дослідження продемонструють перехресні перешкоди.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Стандарт EN 55011 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.icqc.eu/ru/certifikacija-ce/ehlektromagnitnaya-sovmestimost-sertifikat/en-55011>
2. ДСТУ EN IEC 61800-3:2019 Системи силового електроприводу з регульованою швидкістю. Частина 3. Требування до електромагнітної сумісності та спеціальні методи випробування (EN IEC 61800-3:2018, IDT; IEC 61800-3:2017, IDT) [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=88530
3. ДСТУ EN 61000-2-4:2017 Електромагнітна сумісність (ЕМС). Частина 2-4. Електромагнітна обстановка. Рівні сумісності щодо низькочастотних кондуктивних завад для промислових підприємств (EN 61000-2-4:2002, IDT; IEC 61000-2-4:2002, IDT) [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=75936
4. Аналогові вимірювальні фільтри. Класифікація фільтрів. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://analogiu.ru/6/6-5-1.html>
5. Мережеві фільтри. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/4241819/page:31/>
6. Shaffner FN2010-3-06. Power Line Filter, Chassis, General Purpose, 250 VAC, 3 A, Single Phase, 1 Stage, Chassis Mount [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://nl.farnell.com/schaffner/fn2010-3-06/filter-3a-chassis/dp/1191363>
7. F. Leferink, "Educating electromagnetic effects using printed circuit board demos," in Kyoto EMC Conference, Japan, 2009.
8. C. E. Feloups, N. Moonen, and F. Leferink, "Assessment of EMI and Power Quality in Mains Power Distribution Using a Low-Cost Breakout Box for EMC Education," in 2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility–EMC Europe, 2022, pp. 513-518.
9. IEC CISPR, 17-2011: Methods of Measurement of the Suppression Characteristics of Passive Radio Interference Filters and Suppression Components," Czech Technical Standard. Czech Normalization institute. Prague November, 2000.

10. IEEE Std1560-2005 (R2012): IEEE Standard for Methods of Measurement of Radio-Frequency Power-Line Interference Filter in the Range of 100 Hz to 10 GHz

11. Сердюк Т.М. Дослідження мережевих фільтрів низьких частот[Текст]/ Т. Сердюк, К. Сердюк, А. Перельотов, Д. Куліков, В. Дудрич// Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті: матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції. (Дніпро, 14-15 грудня 2022 р.) – Д.: ДІТ, 2022. – с. 37.

12. Сердюк Т.М. Електрифікація і електромагнітна сумісність систем тягового електропостачання з пристроями залізничної автоматики та зв'язку [Текст]/ Т.М. Сердюк, М.С. Серченко, Р.В. Ботнаревська, К.М. Сердюк, Ю.Д. Денисенко// Сучасні транспортні технології: матеріали 14 Міжнародної науково-технічної конференції студентів і молодих вчених імені Георгія Кірпи. Секція «Транспортна інженерія» (Львів, 8 грудня 2022 р.) – Л.: Львів, 2022. – с. 123 - 124.

13. Rodika Botnarevscaia, Ben Pouillaert, Tetiana Serdiuk, Frank Leferink “The influence of high-quality installation and grounding on the operation of filters” 7th IEEE GLOBAL EMC CONFERENCE (GEMCCon) BALI 2023. Publisher: IEEE. Conference Location: Nusa Dua, Bali, Indonessia, 19-20 January, 2023. INSPEC Accession Number: 22884511. DOI: 10.1109/GEMCCON57842.2023.10078224

14.CISPR 17 “Methods of measurement of the suppression characteristics of passive EMC filtering devices,” 2nd Ed. June 2011.

15. IEEE Std1560-2005 (R2012): IEEE Standard for Methods of Measurement of Radio-Frequency Power-Line Interference Filter in the Range of 100 Hz to 10 GHz

16. Елементи для пригнічення електромагнітних завад. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://coretech.com.ua/elements-for-emi-suppression>