

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

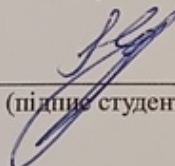
Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

на тему: Дослідження впливу паразитних індуктивностей та ємностей
мережевих фільтрів низьких частот

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

Виконав: студентка групи СК2321 (969-М)

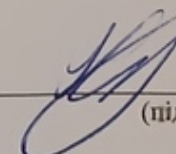

_____ / Денис КУЛІКОВ /
(підпис студента)

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 – 2025 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: Study of the influence of parasitic inductances and capacitances of
low-frequency network filters

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

Done by the student of the group CK2321 (969-M) / Denis Kulikov /

Scientific Supervisor: associate professor / Tetiana Serdiuk /

Dnipro – 2025

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерних технологій і систем
Кафедра: Автоматика та телекомунікації
Рівень вищої освіти: Другий (магістр)
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 _____ магістра
(ступінь вищої освіти)

студенту Куліков, Денис Сергійович
(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: Дослідження впливу паразитних індуктивностей та ємностей мережевих фільтрів низьких частот

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

затверджені наказом від "05 "жовтня 2023 р. № 991-ст

2. Строк подання студентом роботи: 15.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Схема фільтра FN 2030-10-06. Паспортні дані:
Uном =110/220 В, f=50 Гц, Iном=10 А;

C=0,47 мкФ (X2), R=680кОм; L=2x8 мГн, C2=2x4,7 нФ

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

4.1 Критичний аналіз фільтрів низьких частот залізничної автоматики

4.2 Математичне моделювання роботи мережевого фільтра низьких частот

4.3 Експериментальні дослідження фільтра низьких частот

4.4. Дослідження електромагнітної сумісності фільтрів

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

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	15.09.2024	10%
2	Розділ 1. Критичний аналіз фільтрів низьких частот залізничної автоматики	01.10.2024	20%
3	Розділ 2. Математичне моделювання роботи мережевого фільтра низьких частот	05.11.2024	25%
4	Розділ 3. Експериментальні дослідження фільтра низьких частот	15.12.2024	30%
5	Розділ 4. Дослідження електромагнітної сумісності фільтрів		
6	Висновки	15.01.2025	15%
7	Перелік посилань		
8	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	15.01.2025	
9	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	22.01.2025	100%

Студент

_____ (підпис)

Денис КУЛІКОВ

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Тетяна СЕРДЮК

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Відомості про об'єм пояснювальної записки:

- 55 сторінки,
- 29 рисунків,
- 1 таблиць
- 25 джерел використаної літератури.

Завдання дипломної роботи дослідити роботу мережевих фільтрів з урахуванням впливу паразитних індуктивностей і ємностей.

Мета роботи – дослідження роботи мережевих фільтрів за різних умов монтажу та з урахуванням впливу паразитних індуктивностей і ємностей.

В першому розділі виконано критичний аналіз існуючих типів фільтрів низьких частот і досліджено сферу їх застосування, зокрема в залізничній автоматичі.

В другому розділі виконано моделювання роботи мережевого фільтру в нормальному і диференційному режимі з та без урахування паразитичних реактивних елементів.

В третьому розділі виконано експериментальні дослідження фільтрів за різних умов підключення і якості заземлення.

В четвертому розділі досліджено питання електромагнітної сумісності і стандартизації електромагнітних завад мережевих фільтрів.

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, РЕЗОНАНСНІ ЧАСТОТИ, COMMON MODE, DIFFERENTIAL MODE.

ЗМІСТ

Вступ	7
1. Критичний аналіз фільтрів низьких частот залізничної автоматики	9
1.1 Фільтри залізничної автоматиці та зв'язку	9
1.2 Фільтри низьких частот. Теоретичні положення	13
1.3 Висновки за розділом	22
2. Математичне моделювання роботи мережевого фільтра низьких частот	23
2.1. Характеристики і параметри заданого мережевого фільтра	23
2.2. Результати симуляції	38
3. Експериментальні дослідження фільтра низьких частот	31
4. Дослідження електромагнітної сумісності фільтрів	45
4.1 Види електромагнітних завад	45
4.2 Нормування допустимих рівнів електромагнітних перешкод	45
4.3 Пригнічення електромагнітних перешкод	48
Висновки	52
Перелік посилань	53

ВСТУП

Актуальність роботи. Актуальність дослідження фільтрів низьких частот (ФНЧ) і мережевих фільтрів (МФ) зумовлена стрімким розвитком сучасних технологій, які вимагають ефективної обробки сигналів, забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) та підвищення енергоефективності. ФНЧ відіграють ключову роль при обробці сигналів, виділенні низькочастотної складової сигналу, наприклад, в аудіо- та відеотехніці, радіотелефонії, мікроконтролерах, впровадженні 5G та 6G технологій. Для 5G, 6G, IoT технологій потрібні високоточні фільтри для мінімізації електромагнітних перешкод (ЕМП) і забезпечення стабільної передачі даних.

Мережеві фільтри широко застосовуються в енергетиці, в тому числі і у «зеленій», для стабільності функціонування і підвищення ефективності енергосистем, згладжування сигналу у сонячних та вітрових установках. У сучасних електромережах важливе значення має захист обладнання від імпульсних перешкод і гармонік, що створюються потужними електронними пристроями.

Сучасні технології спрямовані на створення компактних і багатофункціональних фільтрів із використанням новітніх матеріалів, таких як метаматеріали та нанотехнології, розробку інтегрованих схем, які поєднують функції фільтрації та обробки сигналу, дотримання стандартів EN 55011, EN 61800 3, EN 61000-2-4/IEC 61000-2-4 для забезпечення ЕМС і якості електроенергії [1-3].

Важливим є використання мережевих фільтрів у системах керування транспортом, дронах і робототехніки для забезпечення надійного їх функціонування в умовах високих перешкод і високочастотній передачі сигналів.

Таким чином, тема дипломної роботи, пов'язана із дослідженням впливу паразитних індуктивностей та ємностей мережевих фільтрів низьких частот є актуальною науково-технічною задачею.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження роботи мережевих фільтрів в умовах впливу паразитних індуктивностей і ємностей.

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».

Дана наукова робота присвячена вивченню роботи пасивних мережевих фільтрів низьких частот в умовах впливу паразитних індуктивностей та ємностей, електромагнітних перешкод.

Отже, тема дипломної роботи, яка пов'язана із дослідженням електромагнітної сумісності фільтрів низьких частот і спектрального складу електромагнітних перешкод в умовах впливу паразитних індуктивностей та ємностей, є актуальною і своєчасною.

1 КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ФІЛЬТРІВ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ

1.1 Фільтри залізничної автоматиці та зв'язку

Фільтри відіграють важливу роль у залізничній автоматиці та зв'язку, забезпечуючи надійність передачі сигналів, їх обробку та захист систем від електромагнітних перешкод. Залізнична автоматика ґрунтується на точній і безперебійній роботі систем сигналізації, які використовуються для управління рухом поїздів. Фільтри в цих системах виконують такі функції:

У каналах зв'язку, що передають сигнали від датчиків (наприклад, кодованих рейкових кіл), фільтри допомагають розділяти частоти корисних сигналів і шуму, ЕМП, захищають від гармонійних спотворень. Системи залізничної автоматики, наприклад автоматична локомотивна сигналізація (АЛС), використовують фільтри для зменшення спотворень, викликаних високочастотними перешкодами.

Так, фільтр автоматичної локомотивної сигналізації ФЛ-25/75-2М – це локомотивний електричний фільтр, розроблений для захисту систем автоматичної локомотивної сигналізації на залізничному транспорті. Він усуває перешкоди, що виникають через тягові струми, і працює на частотах 25 і 75 Гц. Це важливий елемент безпеки, який сприяє стабільній роботі сигналізації та знижує ризики аварій на залізниці.

Фільтр ФЛ-25/75-2М блокує ЕМП на частотах 50, 100 і 150 Гц, що спричиняються тяговими струмами. Схему фільтру дано на рис. 1.1.

Ефективність зменшення сигналу:

на 50 Гц – у 1000 разів;

на 100 Гц – у 40 разів;

на 150 Гц – у 500 разів.

Це особливо важливо для залізниць із електричною тягою змінного струму, де рівень тягових ЕМП може значно перевищувати корисний сигнал.

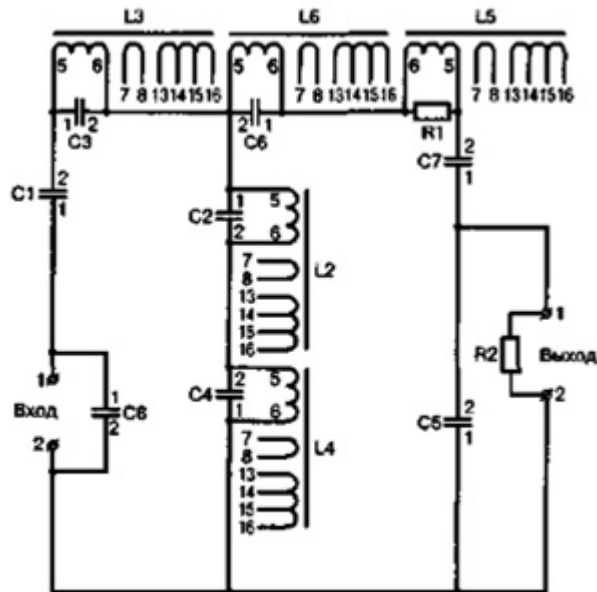


Рисунок 1.1 – Локомотивний фільтр ФЛ-25/75- 2М. Електрична схема

Система локомотивної сигналізації полегшує роботу машиніста, включаючи функції контролю швидкості, перевірки пильності та дублювання показань світлофорів у кабіні. Фільтр є невід’ємною частиною цих функціональних блоків.

За конструкцією цей фільтр має металевий корпус із прямокутною формою, знімною кришкою та ручкою для транспортування. Усередині знаходиться друкована плата з компонентами: котушками індуктивності, конденсаторами та іншим обладнанням.

Фільтр ФЛ-25/75-2М монтується між приймальною котушкою і підсилювачем сигналізації. Завдяки схемі з двома контурами, налаштованими на 25 і 75 Гц, він ефективно знижує вплив тягових перешкод і забезпечує якісну фільтрацію сигналів.

Переваги фільтру ФЛ-25/75-2М:

- висока ефективність у блокуванні перешкод;
- надійність конструкції;
- зручність у монтажі та обслуговуванні.

Фільтри в традиційних релейних системах автоблокування (АБ), електричної (ЕЦ), диспетчерської (ДЦ) та мікропроцесорної (МПЦ) централізацій автоматики фільтри забезпечують надійну та правильну роботу реле, які реагують на певні частоти сигналу. Мінімізують перехресні ЕМП між сигналами в складних схемах управління.

Блок-фільтр захисний ЗБФ-1 (рис.1.2) використовується в рейкових колах числового кодового автоблокування змінного струму. Він обмежує напругу на випрямлячі імпульсного колійного реле ІРВ-110 під час коротких замикань ізолюючих стиків, а також захищає реле від гармонійних спотворень тягового струму.

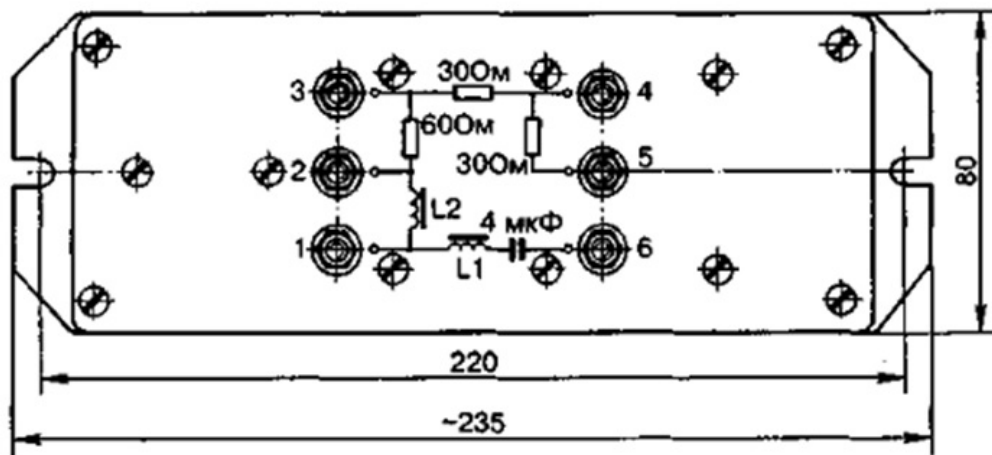


Рисунок 1.2 –Захисного блок-фільтра ЗБФ-1. Електрична схема

ЗБФ-1 складається з захисного блоку для обмеження напруги на випрямлячі. Фільтра використовується для захисту реле від гармонік тягового струму. Його підключення здійснюється через контактні затискачі з використанням гнучкого дроту. За конструкцією він складається з дроселю, який має основну (1620 витків) і секційовану обмотки для налаштування. Використовуються конденсатори типу КБГ-МН-2 та резистори ПЕВ-15. Фільтр зменшує напругу на випрямлячі під час коротких замикань і захищає реле від гармонік, які заважають стабільній роботі рейкових кіл.

Переваги:

- ефективний захист від перешкод;
- простота монтажу;
- довговічність і надійність.

Обидва фільтри – ФЛ-25/75-2М і ЗБФ-1 – мають важливе значення для забезпечення безпеки та стабільності залізничного транспорту, виконуючи ключові функції захисту сигналів від перешкод.

Імпульсні фільтри використовуються для захисту обладнання від короткочасних пікових перевантажень, які можуть виникати через комутаційні процеси або електромагнітні імпульси.

Для залізничного зв'язку фільтри мають критичне значення через високу щільність інформаційного обміну. Вони захищають канали радіозв'язку. У залізничних мережах, особливо в системах GSM-R (спеціалізований стандарт мобільного зв'язку для залізниць), фільтри використовуються для зменшення впливу радіоперешкод.

Широко фільтри використовуються при обробці аудіосигналів. Вони забезпечують якість передачі мовних команд і запобігають втратам корисної інформації через фоновий шум. Смугові фільтри виділяють певні діапазони частот для конкретних видів зв'язку, запобігаючи змішанню сигналів.

В системах електропостачання залізничного транспорту, пристроїв ЕЦ, ДЦ, МПЦ використовуються фільтри для зменшення гармонік. Так, на тягових підстанціях застосовують потужні реактивні фільтри низьких частот і смугові для пригнічення гармонік кратних 300, 600 та 1200 Гц в залежності від схеми випрямлення, які виникають під час роботи випрямлячів. Це важливо для стабільної роботи тягових підстанцій та запобігання пошкодженню обладнання.

Гасіння імпульсних перешкод. Фільтри захищають електронні пристрої, що керують рухом, від імпульсів, які можуть виникати внаслідок перемикання високих струмів.

1.2. Фільтри низьких частот. Теоретичні положення

Фільтри низьких частот (ФНЧ) характеризуються тим, що низькочастотні вхідні сигнали передаються на вихід, починаючи з постійних сигналів, а високочастотні сигнали затримуються.

Наведемо приклади амплітудно-частотних характеристик фільтрів нижніх частот. На рис. 1.3 дано схеми найпростіших ФНЧ типу К. На рис.1.4 дано залежності згасання фільтру від частоти і опорів гілок фільтрів. Частотні характеристики Т- та П-подібних ФНЧ типу К приведені на рис.1.5. Смуга пропускання знаходиться в діапазоні від нульової частоти до частоти зрізу f_c . Зазвичай гранична частота визначається як частота, на якій значення $A(\omega)$ дорівнює 0,707 максимального значення (тобто на 3 дБ менше максимального значення).

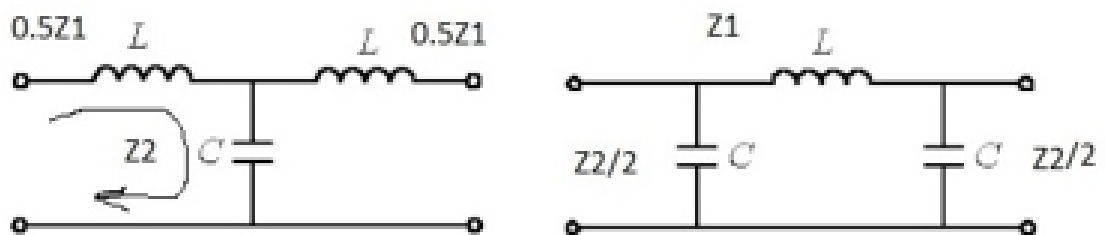


Рисунок 1.3 – Електричні схеми Т- та П-подібних ФНЧ типу К

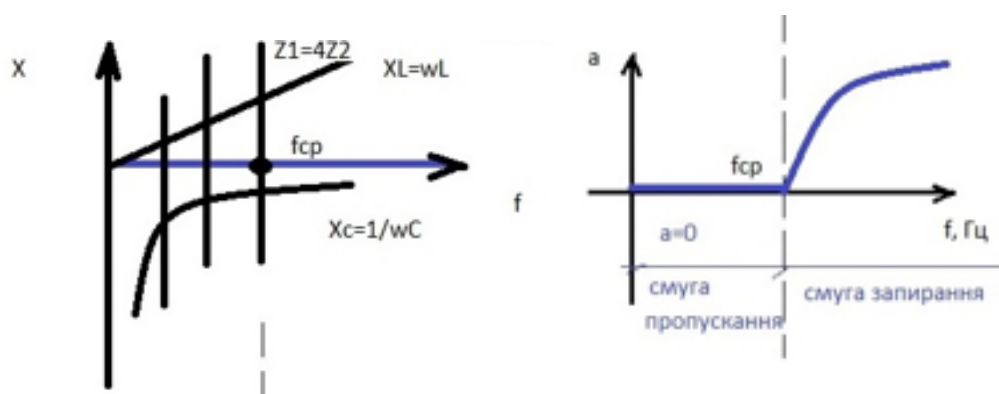


Рисунок 1.4 – Залежність згасання і опорів гілок фільтру низьких частот типу » від частоти

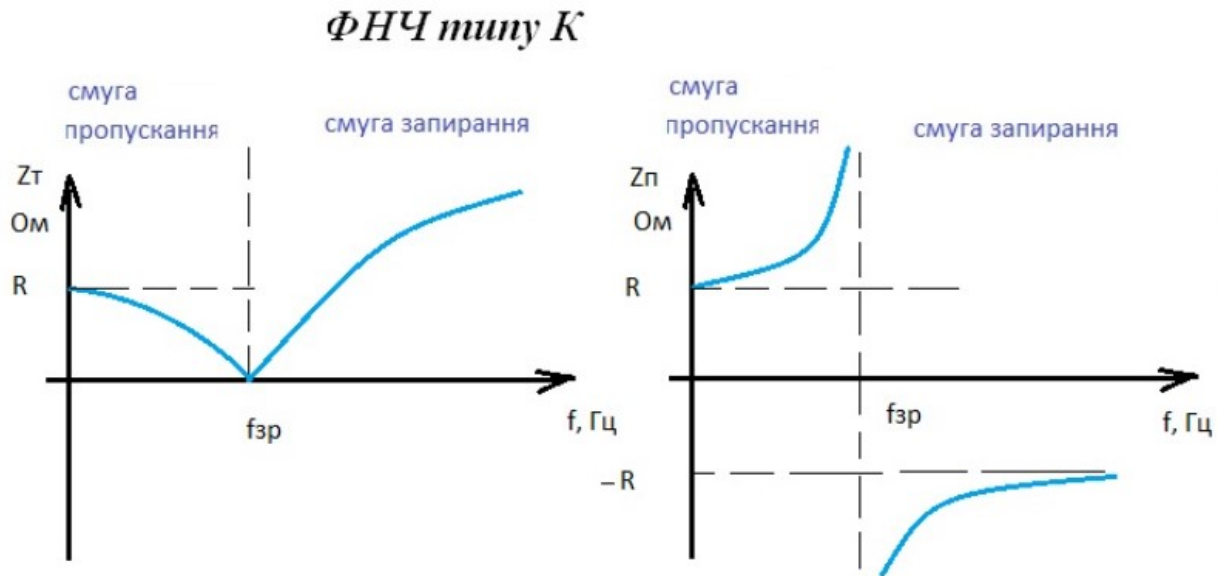


Рисунок 1.5 – Частотні характеристики Т- та П-подібних ФНЧ типу К

Кожна з наведених схем (рис.1.3) через свою симетричність характеризується лише двома параметрами:

- характеристичний опір Z_x ;
- постійна передачі $q_c = a_c + j b_c$,

де a_c — власне загасання фільтра, b_c — його власний фазовий коефіцієнт.

У симетричних підключеннях фільтрів фактичне загасання як функція частоти визначається тільки типом фільтра (ФНЧ або ФВЧ) і не залежить від його конструктивної схеми (Т-подібна або П-подібна).

Таким чином, частоти зрізу фільтрів низьких частот, зібраних за Т- та П-подібними схемами, як показано на рис. 1.3, дорівнюють:

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

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

Нормалізована частота:

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

Тоді частотні залежності власного загасання ФНЧ і ФВЧ можна представити у вигляді:

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

Характерний опір фільтра залежить як від його типу (фільтр низьких частот або фільтр високих частот), так і від конструкції. Розглянемо номінальний характерний опір:

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

Тоді частотні залежності фільтрів, складених за схемами, наведеними на рис. 1.5, визначаються (в порядку проходження цих схем) наступним чином:

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

У порівнянні з фільтрами типу «К» фільтри типу «т» дозволяють досягти наступного:

1) слабка частотна залежність характеристичного опору в значній частині смуги пропускання (це покращує узгодження фільтра з активним частотно-незалежним опором навантаження);

2) швидке зростання самозагасання аж до нескінченної величини на частоті $f_{с}$, при переході від смуги пропускання до смуги зупинки (це

покращує вибірковість фільтра). Але в міру віддалення від f_{∞} в глибині смуги затримки значення a_s знову зменшується. Тому на практиці фільтри типу «m» часто є частиною складних фільтрів, утворених каскадним узгодженим включенням напівзв'язків типу «m» і зв'язків типу «K». Якщо граничні частоти всіх каскадів однакові, значення комплексних фільтрів дорівнює сумі власних загасань цих каскадів і також є досить великим у глибині смуги затримки. Фільтри типу «m» також використовуються як самостійні вузли, наприклад, фільтр Д-268 багатоканальної системи передачі К-60.

У даній роботі досліджено фільтр низьких частот (ФНЧ), який побудовано за схемою Г-подібного паралельного похідного напівпереходу (рис. 1.6).

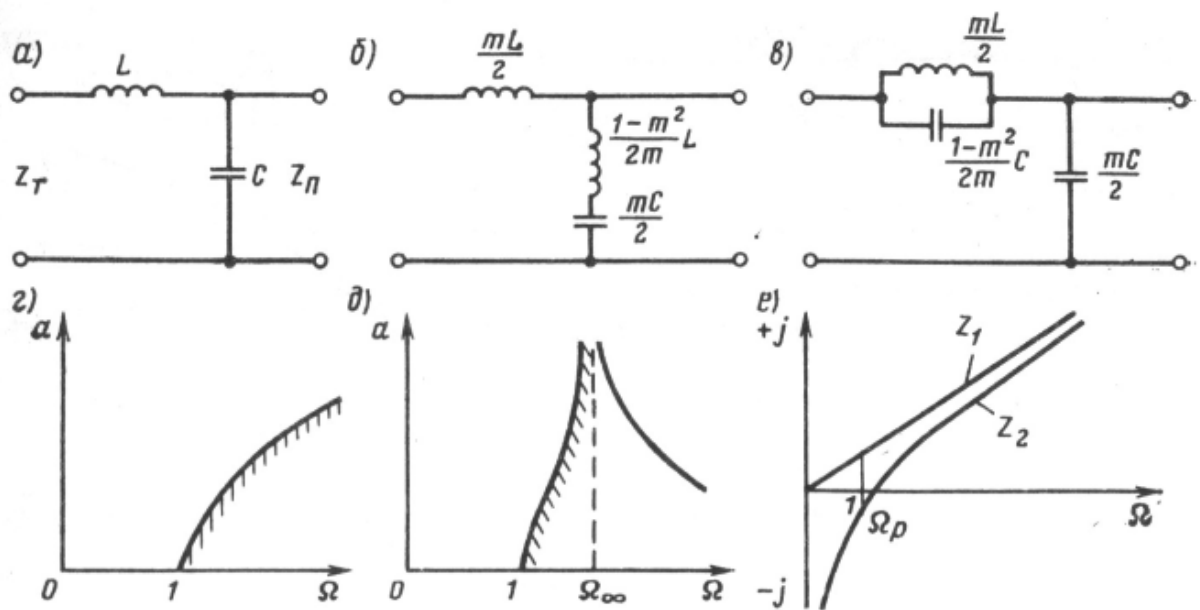


Рисунок 1.6 – Фільтр низьких частот типу «K» (а) і П-подібне (б) і Т-подібне з'єднання (в) типу «m».

Його параметри і властивості визначаються такими співвідношеннями:

Частота нескінченного згасання

$$f_{\infty} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1.7)$$

частота зрізу

$$f_{cp} = f_{\infty} \sqrt{1 - m^2} \quad (1.8)$$

Коефіцієнтом, що визначає частоту нескінченного завмирання фільтра і залежить від значення його параметрів є його власне завмирання.

$$m = \sqrt{\frac{C_2}{L_1 C_1 + C_2}}, \quad m = \sqrt{1 - \frac{1}{\Omega_{\infty}^2}}, \quad \Omega_{\infty} = \frac{f_{\infty}}{f_{cp}} \quad (1.9)$$

Залежність між частотою зрізу і частотою нескінченного спаду

$$f_{cp} = f_{\infty} \sqrt{1 - m^2}, \quad (1.10)$$

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

$$a(f) = 2 \operatorname{arch} \frac{m\Omega}{\sqrt{1 - \Omega^2(1 - m^2)}}; \quad 1 \leq \Omega < \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}}; \quad (1.12)$$

$$a(f) = 2 \operatorname{arch} \frac{m\Omega}{\sqrt{\Omega^2(1 - m^2) - 1}}; \quad \Omega \geq \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}}; \quad (1.13)$$

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

Номінальний характеристичний опір

$$R = \rho = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}}; \quad (1.14)$$

Характеристика опору для Тm-подібної схеми

$$Z_{Tm}(f) = \rho \frac{\sqrt{1 - \Omega^2}}{1 - \Omega^2(1 - m^2)} = R \frac{\sqrt{1 - \frac{f^2}{f_{cp}^2}}}{1 - \frac{f^2}{f_{cp}^2}(1 - m^2)} \quad (1.15)$$

Характерний опір для Пm-подібного кола

$$Z_{Пm}(f) = R \frac{1}{\sqrt{1 - \Omega^2}} (1 - \Omega^2 (1 - m^2)) = \frac{R}{\sqrt{1 - \frac{f^2}{f_{cp}^2}}} \left(1 - \frac{f^2}{f_{cp}^2} (1 - m^2)\right), \quad (1.16)$$

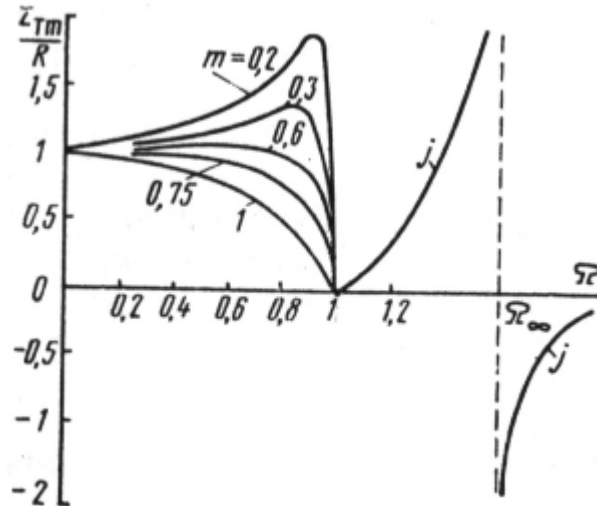


Рисунок 1.7 – Частотні характеристики $Z_{Tm}(f)$ ФНЧ типу m

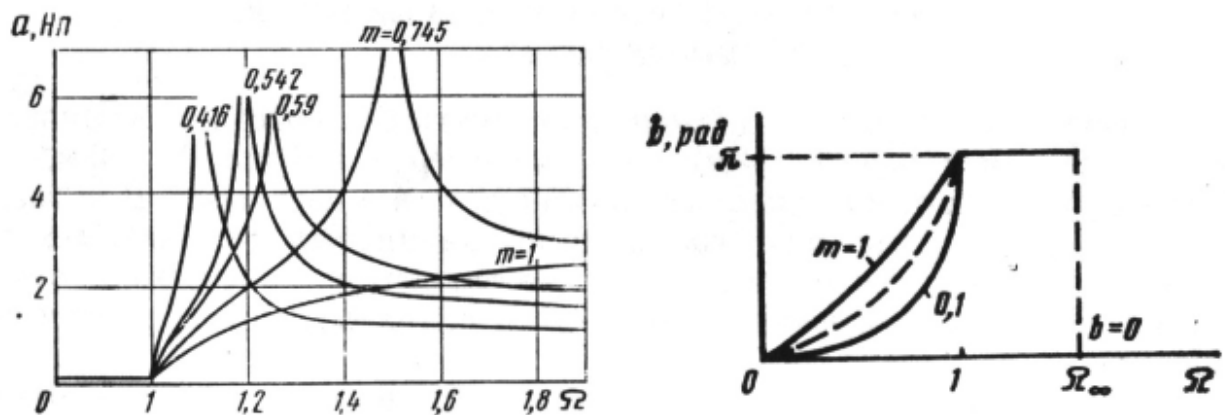


Рисунок 1.8 – Залежність загасання та коефіцієнта фази Т- та П-подібних ФНЧ типу m

Мостові фільтри були створені для усунення недоліків, властивих К – фільтрам і фільтрам типу m. На початку для усунення таких недоліків, як низьке згасання і сильна залежність опору в смузі пропускання від частоти, були створені фільтри типу m. Це досягається введенням послідовної або

паралельної ланки. Характеристичний опір фільтрів типу m мало залежить від частоти, тому узгодженого режиму вдається досягнути по всій смузі пропускання. Головною недолікою m – фільтрів є певна зміна кривої згасання в деяких областях.

Мостові фільтри низьких частот є схемами електричних фільтрів, що використовують мостову топологію для обробки сигналів і виділення низькочастотних компонентів (рис.1.9). Такі фільтри застосовуються у широкому спектрі електронних пристроїв, де необхідно усувати високочастотні ЕМП або обмежувати частотний спектр сигналу. В схемі симетричного мостового чотирьохполюсника, що використовується в електричних фільтрах, для спрощення малюнка два плечі часто замінюють штриховими лініями.

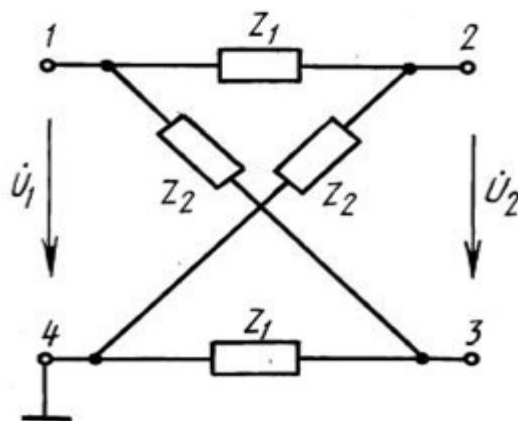


Рисунок 1.9 – Мостовий фільтр

Електричне коло, зібране за симетричною мостовою схемою (рис. 1.9, 1.10), володіє власною постійною передачі та характеристичним опором, обумовленим зі співвідношень:

$$\text{th}(q/2) = \sqrt{Z_1/Z_2}, \quad (1.17)$$

$$Z_{\text{XM}} = \sqrt{Z_1 Z_2}, \quad (1.18)$$

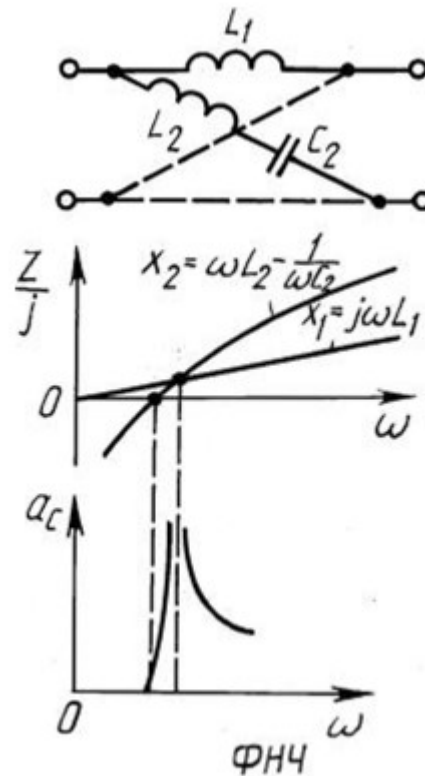


Рисунок 1.10 – Частотна характеристика $Z(f)$ і залежність згасання від частоти $a(f)$ мостового ФНЧ

Частотна характеристика $Z(f)$ і залежність згасання від частоти $a(f)$ мостового ФНЧ приведена на рис.1.10.

Характеристики і параметри фільтра визначаються наступними співвідношеннями:

- частота зрізу

$$f_{cp} = 1/(2\pi\sqrt{L_2C_2}); \quad (1.19)$$

- частота нескінченного загасання

$$f_{\infty} = f_{cp}\sqrt{1-m^2}; \quad (1.20)$$

$$m = \sqrt{C_2/C_1}; \quad (1.21)$$

власне загасання

$$\alpha(f) = \begin{cases} 0, & 0 \leq f \leq f_{\infty}; \\ 2 \operatorname{arth} \frac{\sqrt{1 - \Omega^2}}{m}, & f_{\infty} < f \leq f_{cp}; \\ 2 \operatorname{arth} \frac{m}{\sqrt{1 - \Omega^2}}, & f > f_{cp}; \end{cases} \quad (1.22)$$

де Ω - нормована частота:

$$\Omega = \omega z p / p = f z p / f \quad (10.7)$$

комплексний характеристичний опір

$$\rho = \sqrt{L_2 / C_1} \quad (10.8)$$

характеристичний опір

$$Z_{ХМ}(f) = \rho \sqrt{1 - \frac{1}{\Omega^2}} \quad (10.9)$$

Мостова схема забезпечує високу чутливість до частот, дозволяючи точно налаштувати граничну частоту (частоту зрізу). Типові схеми мостових ФНЧ: міст Віна (використовується в активних і пасивних фільтрах, забезпечує хорошу селективність і налаштовується за допомогою RC-компонентів), міст Хейтера (удосконалений варіант для використання у високоточних додатках. Дозволяє гнучко налаштовувати характеристику фільтра), міст з операційними підсилювачами (удосконалені активні фільтри на основі мостової схеми, забезпечують високий коефіцієнт підсилення та додаткову стабільність)

Переваги мостових ФНЧ:

- точність фільтрації;
- селективність (висока здатність виділяти потрібні частоти);
- стабільність (мінімальний вплив зовнішніх факторів, таких як температура);

- гнучкість (можливість використання як в активному, так і в пасивному виконанні).

Сфера застосування мостових ФНЧ:

- аудіотехніка (для згладжування сигналів і зменшення шумів);
- системи управління (усунення перешкод у контролерах);
- радіотехніка (захист обладнання від високочастотних перешкод);
- електропостачання (фільтрація гармонік у мережевих адаптерах).

Мостові фільтри низьких частот є універсальними і широко застосовуються для забезпечення стабільної роботи електронних систем, покращення якості сигналу та усунення перешкод.

1.3 Висновок за розділом

Розглянуто основні типи фільтрів низьких частот і сфера їх застосування в залізничній автоматиці та зв'язку.

У подальших дослідженнях слід приділити увагу дослідженню мережевих фільтрах як різновиду фільтрів низьких частот, які пригнічують високочастотні ЕМП, забезпечуючи захист обладнання та зниження їх рівня. Зростання вимог до електромагнітної сумісності радіоелектронних систем вимагає впровадження перспективних рішень, таких як активні й інтегровані фільтри. Їхнє використання сприяє підвищенню безпеки, стабільності та надійності залізничного транспорту.

Фільтри в залізничній автоматиці та зв'язку залишаються критичним елементом, що забезпечує безпеку, ефективність і стабільність залізничних перевезень.

При виконанні дипломної роботи слід ураховувати дані викладені в [13-24]. Дане наукове дослідження стало продовженням бакалаврської дипломної роботи на тему: «Дослідження впливу паразитних індуктивностей та ємностей мережевих фільтрів низьких частот», [25].

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕРЕЖЕВОГО ФІЛЬТРА НИЗЬКИХ ЧАСТОТ

2.1 Характеристики і параметри заданого мережевого фільтра

Мережевими фільтрами, що пригнічують ЕМП, є фільтри низьких частот, які вільно пропускають мережну напругу (корисний сигнал) і фільтрують високочастотні складові, що містяться в мережі (гармоніки, в тому числі і утворюють спектр імпульсних перешкод). Їх використання служить двом цілям: по-перше, для захисту пристрою від перешкод від мережі електроживлення, по-друге, для зниження рівня випромінювання можливих перешкод, що надходять від пристрою через кабелі живлення. Поздовжній елемент фільтра підбирається з урахуванням споживаного струму. Хоча загальний імпеданс джерела та приймача перешкод зазвичай невідомий, часто можна припустити, що опір мережі малий, а опір навантаження великий. У цьому відношенні домінують фільтри для захисту обладнання від мережевих перешкод [6–10].

Мережевий фільтр ЕМП рекомендується розмістити в додатковому металевому ящику. Створюючи різні умови контакту між мережевим фільтром ЕМП в металевому корпусі та додатковою металеву коробкою, можна досліджувати відгук лінійного фільтра ЕМП в діапазоні частот від 10 кГц до 100 МГц [6-13]. Етапи перевірки в залежності від якості контакту між корпусом мережевого фільтра і додатковою металеву коробкою:

Вимірювання проводились за проектом Інституту силової електроніки та електромагнітної сумісності Університету Твенте в рамках проекту ETUT, що фінансується програмою досліджень та інновацій Європейського Союзу Horizon 2020 у рамках стипендійної угоди Марії Склодовської-Кюрі № 955646 [11]. -13].

Мережеві фільтри повинні послаблювати високочастотні коливання і пропускати низькочастотні (промислові) коливання без загасання. Тому вони

реалізовані з урахуванням фільтрів нижніх частот (ФНЧ). Інтерференційні фільтри реалізуються каскадними Г- або Т-подібними ланками. Комбінуючи такі ланки, досягається необхідний рівень загасання. Конструкція фільтра багато в чому визначається внутрішнім опором джерела перешкод, опором мережі і типом перешкод. На рис. 2.1 показана типова схема дволанкового фільтра, що пригнічує синфазні і диференціальні перешкоди [13-15,24].

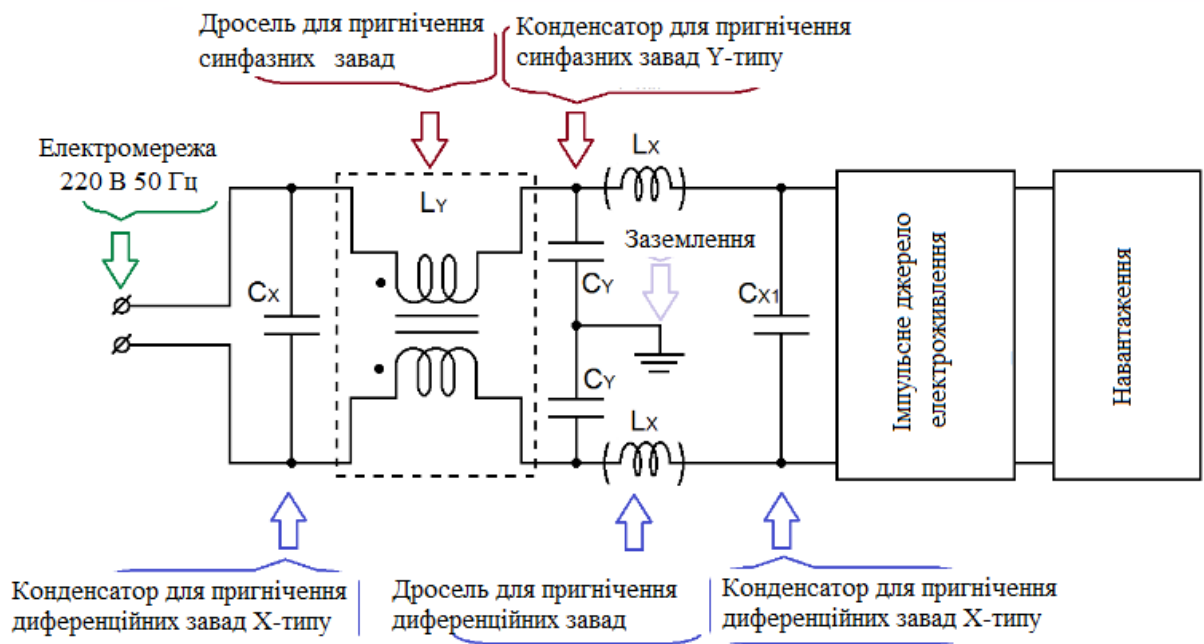


Рисунок 2.1 – Індуктивно-ємнісний фільтр пригнічення електромагнітних перешкод на вході вторинного джерела живлення

Основні характеристики конденсаторів типу X і Y.

X-конденсатори (назва походить від англійського терміна cross-the-line) встановлюються між лініями. До них пред'являються високі вимоги безпеки. Вони повинні витримувати максимально можливі скачки напруги в мережі, не повинні загорятися і не підтримувати вогонь.

Y-конденсатори призначені для використання в місцях, де їх несправність загрожує життю людей. Такі конденсатори мають підвищену електричну і механічну міцність.

Зазвичай використовуються конденсатори типу X1 і X2, Y1 і Y2 для:

- збільшення ємності конденсатора CX покращує фільтрацію диференціального шуму, але призводить до збільшення реактивного струму.
- збільшення ємності конденсатора CY покращує фільтрацію синфазного шуму, але збільшує струм витоку.
- збільшення індуктивності дроселів покращує фільтрацію, але призводить до збільшення ефективного опору обмоток.

Тому при розробці мережевого фільтра важливо дотримуватися певного балансу між характеристиками компонентів пристрою.

Для конденсаторів CX CX1 слід використовувати конденсатори з металеві фольги, бажано з поліпропіленовим діелектриком. Перевірте плівкові конденсатори SPKF. Конденсатори CY можуть бути плівковими або керамічними. Перевірте керамічні конденсатори SPKC.

Найскладнішим елементом фільтра є LY - так званий синфазний дросель, до якого пред'являються досить високі вимоги до стійкості до високої електричної напруги між обмотками і пропускної здатності по струму. Дізнайтеся про синфазні дроселі D2U. Дізнайтеся про синфазні дроселі D2T. В ідеалі такі дроселі повинні мати дві абсолютно однакові обмотки. Слід зазначити, що в реальних виробках з обмотками завжди є певна величина потоку витоку, а реальний «синфазний» дросель має певну величину «диференціальної» індуктивності.

Дроселі LX повинні витримувати великі струмові навантаження. Для їх виготовлення доцільно використовувати як феритові сердечники із зазором, так і сердечники з порошкових матеріалів із розподіленим немагнітним зазором (магнітодіелектрики). Дізнайтеся про дроселі загального режиму DPT.

Потім розглядається вплив використання окремих компонентів фільтра на спектр перешкод сигналу в порівнянні з рівнем перешкод згідно стандарту EN55022. Імпульсні ІВП створюють найсильніші перешкоди в діапазоні

частот сотень кілогерц, який є найближчим до робочих частот імпульсних перетворювачів [13-24].

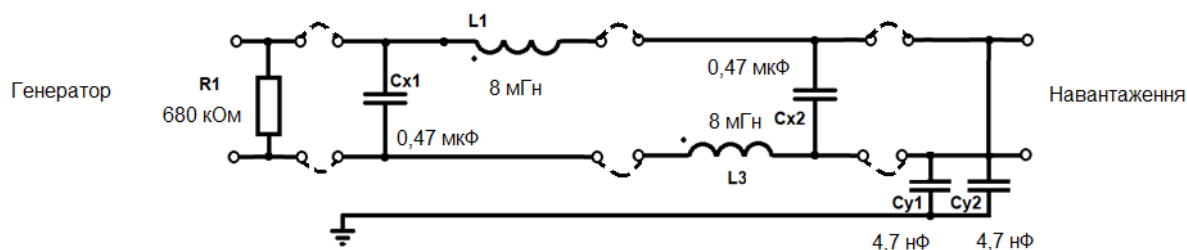


Рисунок 2.2 – Представлення мережевого фільтру 50 Гц у вигляді ланок Г-подібних ланок фільтру низьких частот без урахування паразитних індуктивностей і ємностей

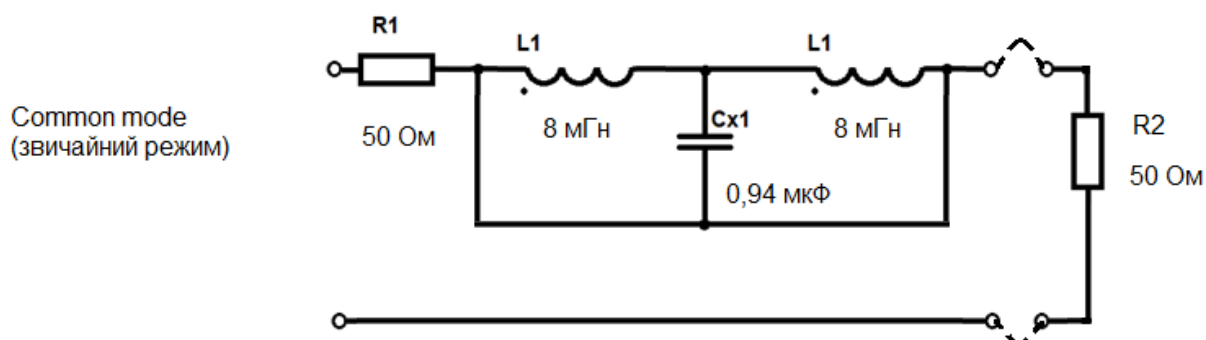


Рисунок 2.3 – Мережевий фільтр 50 Гц у (фільтру низьких частот) в режимі common mode без урахування паразитних індуктивностей і ємностей

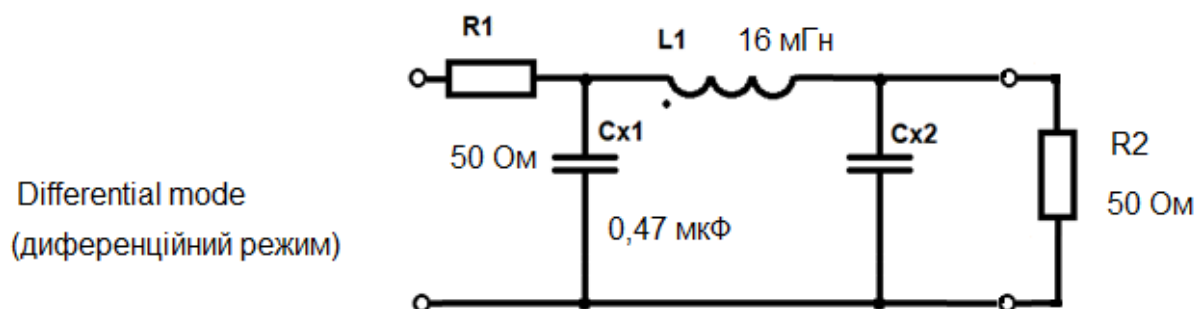


Рисунок 2.4 – Мережевий фільтр 50 Гц у (фільтру низьких частот) в режимі differential mode без урахування паразитних індуктивностей і ємностей

За результатами експериментальних і теоретичних досліджень встановлено, що паразитичні індуктивності і ємності виникають в таких випадках [24]:

- поганий контакт при заземленні фільтра. Величина паразитної ємності $20 \cdot 10^{-12}$ Ф;
- довгий провід, використаний для заземлення фільтра (30 см). При цьому виникають паралельні індуктивності і ємності, які включені паралельно і дорівнюють $35 \cdot 10^{-9}$ Гн, $20 \cdot 10^{-12}$ Ф;
- короткий провід, використаний для заземлення фільтра (5 см). При цьому виникають паралельні індуктивності і ємності, які включені паралельно і дорівнюють $5 \cdot 10^{-9}$ Гн, $20 \cdot 10^{-12}$ Ф.

На рис.2.5, 2.6 дано схеми заміщення мережевого фільтр 50 Гц в режимі common mode з урахування паразитної ємності і паразитних індуктивності і ємності. В результаті такі схеми можна розглядати як багатоелементний реактивний двополюсник і визначити резонансні і антирезонансні частоти.

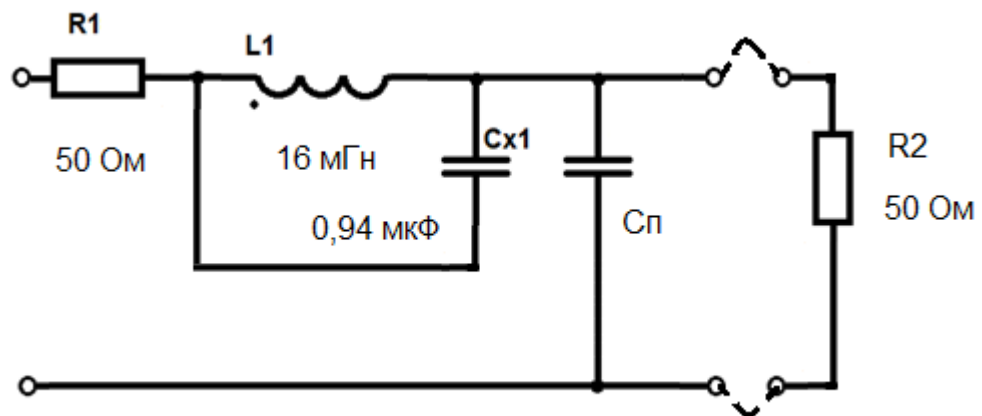


Рисунок 2.5 – Схема заміщення мережевого фільтр 50 Гц в режимі common mode з урахування паразитної ємності

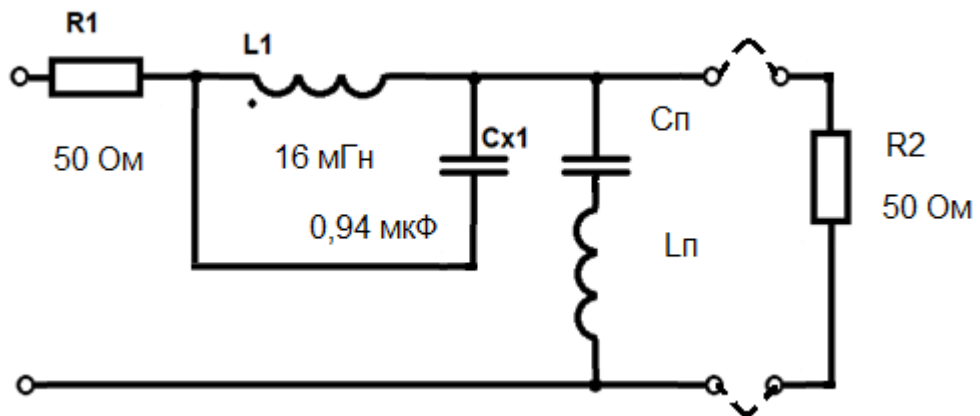


Рисунок 2.6 – Схема заміщення мережевого фільтр 50 Гц в режимі common mode з урахування паразитних індуктивностей і ємностей

На рис.2.7, 2.8 представлені схеми заміщення мережевого фільтр 50 Гц в режимі differential mode з урахування паразитної ємності і паразитних індуктивності і ємності. В результаті такі схеми можна розглядати як несиметричний П-подібний пачивний чотириполюсник і визначити частоти зрізу (резонансні і антирезонансні частоти).

Differential mode

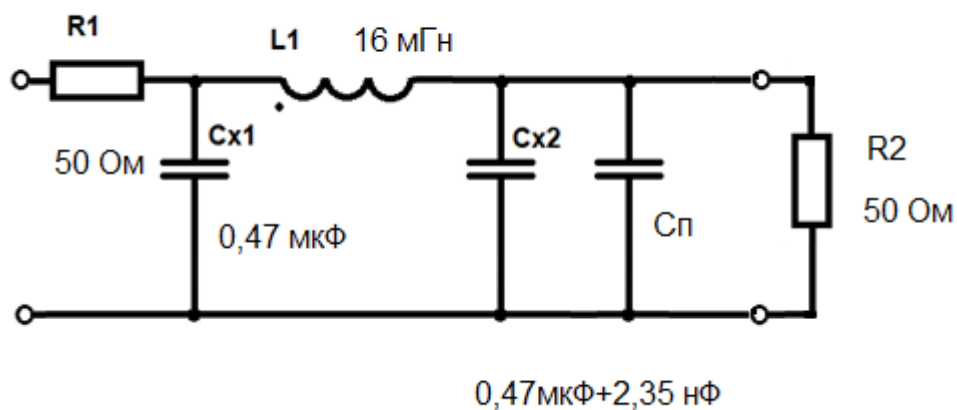


Рисунок 2.7 – Схема заміщення мережевого фільтр 50 Гц в режимі differential mode з урахування паразитної ємності

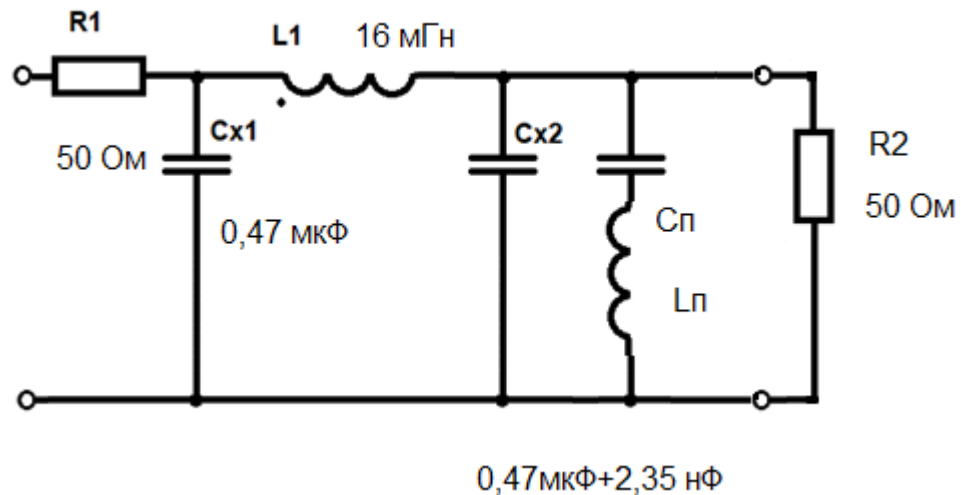


Рисунок 2.8 – Схема заміщення мережевого фільтра 50 Гц в режимі differential mode з урахування паразитних індуктивностей і ємностей

2.2. Результати симуляції

Дане наукове дослідження стало продовженням бакалаврської дипломної роботи на тему: «Дослідження впливу паразитних індуктивностей та ємностей мережевих фільтрів низьких частот», [25]. При виконанні дипломної роботи враховувалися дані, викладені в [13 - 24] і використовувалися в якості вихідних при визначенні величин паразитичних індуктивностей і ємностей, нормативних документів і паспортних даних для обраного типу фільтра.

Перевіримо за допомогою MathCad чи впливають знайдені паразитні індуктивності, ємності на величину частоту зрізу і характеристичний опір фільтра.

Вихідні дані.

Схема фільтра FN 2030-10-06 (див. рис.2.1, 2.2).

Паспортні дані фільтра: $U_{ном} = 110/220$ В, $f = 50$ Гц, $I_{ном} = 10$ А; $C = 0,47$ мкФ (X2), $R = 680$ кОм; $L = 2 \times 8$ мГн, $C2 = 2 \times 4,7$ нФ.

Моделювання за схемами 2.1-2.3 було виконано за умови спрощення розгляду схеми заміщення. В результаті схему (див. рис.2.1) було розбито на

Г-подібні чотирьополосники – фільтри низьких частот, які з'єднанні каскадно. Загальне згасання такої складної схеми є сумою згасань її ланок.

Нижче дано результати моделювання, виконані в MathCad. З результатів моделювання видно, що враховування паразитних індуктивностей і ємностей елементів фільтру впливає на величину частоти зрізу, яка майже не змінюється до 100 кГц, а далі збільшується із ростом частоти.

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

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

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

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

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

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

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

Характеристичний опір однієї Г-подібної ланки

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

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

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

Залежність характеристичного опору від частоти дано на рис.2.9, залежність згасання від частоти дано на рис.2.10.

$$R1 = 130.466 \text{ Ом}$$

$$R2 = 130.463 \text{ Ом}$$

$$R3 = 130.438 \text{ Ом}$$

Частота зрізу

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

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

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

$$f := 0..100000 \text{ Гц}$$

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

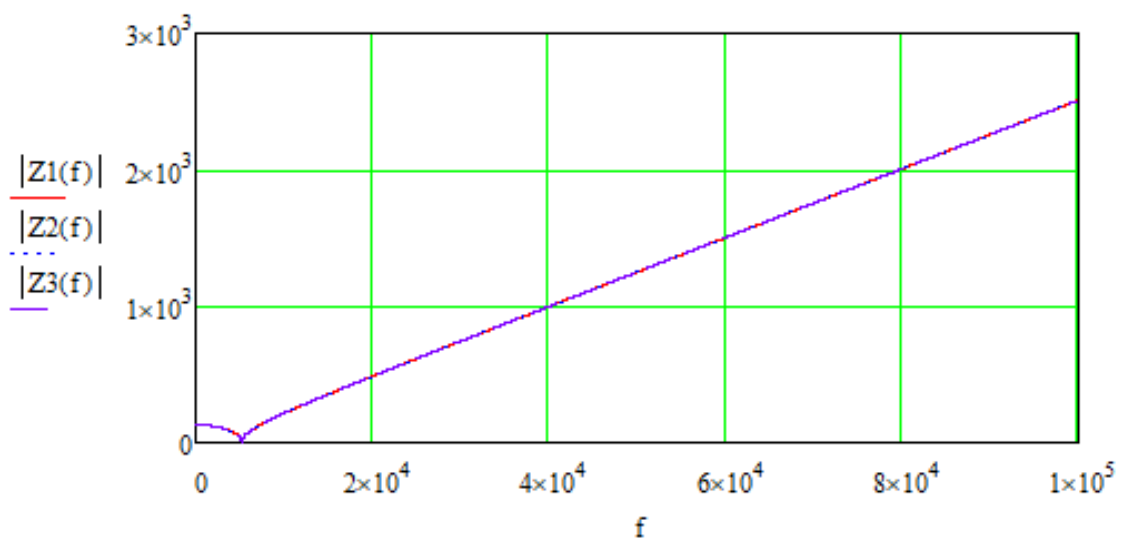


Рисунок 2.9 – Залежність опору фільтру від частоти

Виконані дослідження показали, що в діапазоні до 100кГц паразитні індуктивності і ємності не впливають значно на фільтр низьких частот (мережевий фільтр 50 Гц).

$$a_1(f) := 2 \cdot \operatorname{acosh}\left(\frac{f}{f_{z1}}\right) \quad a_2(f) := 2 \cdot \operatorname{acosh}\left(\frac{f}{f_{z2}}\right) \quad a_3(f) := 2 \cdot \operatorname{acosh}\left(\frac{f}{f_{z3}}\right)$$

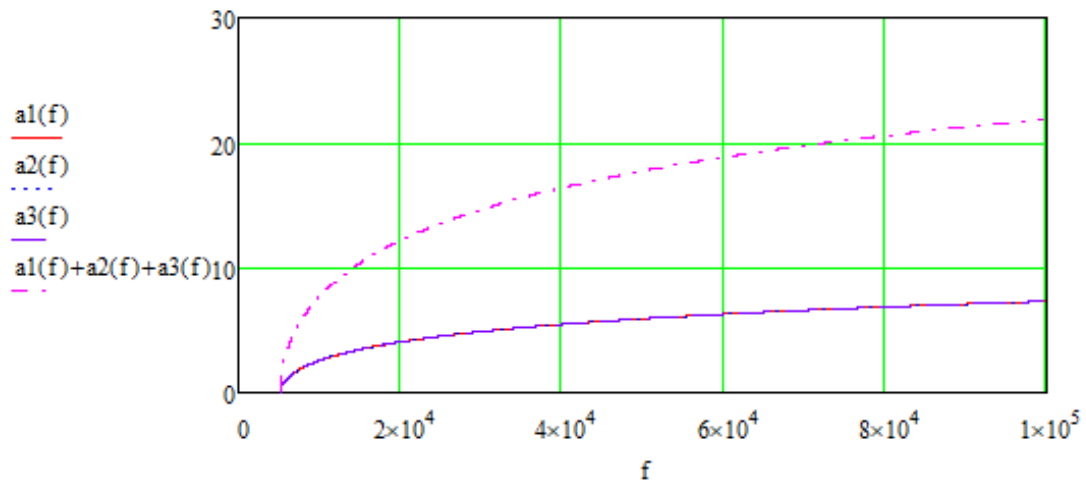


Рисунок 2.10 – Залежність згасання фільтру від частоти

2.3. Моделювання в режимі common mode

Загальний реактивний опір кола, який дано на рис.2.5

$$X_{L1} = j\omega L1, \quad X_{Cx1} = \frac{1}{j\omega Cx1}, \quad X_{Cn} = \frac{1}{j\omega Cn}$$

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота, $j = \sqrt{-1}$ - уявна (мніма) одиниця.

$$\begin{aligned} Z(j\omega) &= \frac{X_{L1} \cdot X_{Cx1}}{(X_{L1} + X_{Cx1})} + X_{Cn} = \frac{j\omega L1 \cdot \frac{1}{j\omega Cx1}}{j\omega L1 + \frac{1}{j\omega Cx1}} + \frac{1}{j\omega Cn} = \frac{j\omega L1 \cdot \frac{1}{j\omega Cx1}}{\frac{j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1}{j\omega Cx1}} + \frac{1}{j\omega Cn} = \\ &= \frac{j\omega L1}{j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1} + \frac{1}{j\omega Cn} = \frac{j\omega L1 \cdot j\omega Cn + j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1}{(j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1)j\omega Cn} \end{aligned}$$

На резонансній частоті опір кола дорівнює 0, тому якщо чисельник кола дорівнюватиме 0, можна вивести формулу для визначення резонансної частоти

$$j\omega L1 \cdot j\omega Cn + j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1 = 0$$

$$j^2 \omega^2 L1 \cdot Cn + j^2 \omega^2 L1 \cdot Cx1 + 1 = 0 \quad j^2 = (\sqrt{-1})^2 = -1$$

$$-\omega^2 L1 \cdot Cn - \omega^2 L1 \cdot Cx1 = -1$$

$$\omega^2 = \frac{1}{L1 \cdot (Cn + Cx1)}$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{L1 \cdot (Cn + Cx1)}} \text{ - резонансна частота}$$

На антирезонансній частоті опір кола дорівнює нескінченності, тому якщо знаменник кола дорівнюватиме 0, можна вивести формулу для визначення антирезонансної частоти

$$(j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1)j\omega Cn = 0$$

$$j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1 = 0$$

$$-\omega^2 Cx1 \cdot L1 = -1$$

$$\omega^2 = \frac{1}{Cx1 \cdot L1}$$

$$\omega_a = \sqrt{\frac{1}{Cx1 \cdot L1}} \text{ - антирезонансна частота}$$

Загальний реактивний опір кола, який дано на рис.2.6

$$X_{L1} = j\omega L1, X_{Cx1} = \frac{1}{j\omega Cx1}, X_{Cp} = \frac{1}{j\omega C_p}, X_{Lp} = j\omega Lp$$

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота, $j = \sqrt{-1}$ – уявна (мніма) одиниця.

$$\begin{aligned}
Z(j\omega) &= \frac{X_{L1} \cdot X_{Cx1}}{(X_{L1} + X_{Cx1})} + X_{Cn} + X_{Lp} = \frac{j\omega L1 \cdot \frac{1}{j\omega Cx1}}{j\omega L1 + \frac{1}{j\omega Cx1}} + \frac{1}{j\omega Cp} + j\omega Lp = \\
&= \frac{j\omega L1 \cdot \frac{1}{j\omega Cx1}}{j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1} + \frac{1 + j\omega Cp j\omega Lp}{j\omega Cp} = \\
&= \frac{j\omega L1}{j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1} + \frac{1 + j\omega Cp j\omega Lp}{j\omega Cp} = \frac{j\omega L1 \cdot j\omega Cp + (j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1)(1 + j\omega Cp j\omega Lp)}{(j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1)j\omega Cp}
\end{aligned}$$

На резонансній частоті опір кола дорівнює 0, тому якщо чисельник кола дорівнюватиме 0, можна вивести формулу для визначення резонансної частоти

$$\begin{aligned}
j\omega L1 \cdot j\omega Cp + (j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1)(1 + j\omega Cp j\omega Lp) &= 0 \\
-\omega^2 L1 \cdot Cp + (-\omega^2 Cx1 L1 + 1)(1 - \omega^2 Cp Lp) &= 0 \\
-\omega^2 L1 \cdot Cp - \omega^2 Cx1 L1 - \omega^2 Cp Lp - \omega^4 Cx1 L1 Cp Lp + 1 &= 0 \\
-\omega^2 (L1 \cdot Cp + Cx1 L1 + Cp Lp) - \omega^4 Cx1 L1 Cp Lp + 1 &= 0
\end{aligned}$$

В результаті отримуємо резонансні частоти, які є рішенням за даними умовами. Обираємо позитивні дійсні значення.

$$Lp := 5 \cdot 10^{-9} \quad \text{Гн} \quad Cp := 20 \cdot 10^{-12} \quad \text{Ф} \quad C1 = 4.7 \times 10^{-7} \quad \text{Ф} \quad L1 = 0.016 \quad \text{Гн}$$

$$-\omega^4 \cdot Cx1 \cdot L1 \cdot Cp \cdot Lp - \omega^2 \cdot (Cx1 \cdot L1 + L1 \cdot Cp + Cp \cdot Lp) + 1 \text{ solve} \rightarrow \begin{pmatrix} -8154.0141687436344258 \\ 8154.0141687436344258 \\ -3.1623113012621676877e9i \\ 3.1623113012621676877e9i \end{pmatrix}$$

$$fp := \frac{8154}{2 \cdot \pi} \quad fp = 1.298 \times 10^3 \quad \text{Гц}$$

На антирезонансній частоті опір кола дорівнює нескінченності, тому якщо знаменник кола дорівнюватиме 0, можна вивести формулу для визначення антирезонансної частоти

$$(j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1)j\omega Cn = 0$$

$$j\omega Cx1 \cdot j\omega L1 + 1 = 0$$

$$-\omega^2 Cx1 \cdot L1 = -1, \quad \omega^2 = \frac{1}{Cx1 \cdot L1}$$

$$\omega_a = \sqrt{\frac{1}{Cx1 \cdot L1}} \text{ - атирезонансная частота}$$

Урахування паразитних індуктивностей та ємностей при різній якості заземлення
рис.2.5

$$L1 := 16 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad Cx1 := 0.94 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \quad Cp := 20 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$$

Антирезонансна частота

$$\omega_a := \sqrt{\frac{1}{L1 \cdot Cx1}} \quad \omega_a = 8.154 \times 10^3 \quad \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Резонансна частота

$$\omega_p := \sqrt{\frac{1}{L1 \cdot (Cp + Cx1)}} \quad \omega_p = 8.154 \times 10^3 \quad \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$X(\omega) := \frac{i\omega L1 \cdot i\omega Cp + i\omega L1 \cdot i\omega Cx1 + 1}{(i\omega L1 \cdot i\omega Cx1 + 1) \cdot (i\omega Cp)}$$

$$\omega := 0, 1000.. 10^6$$

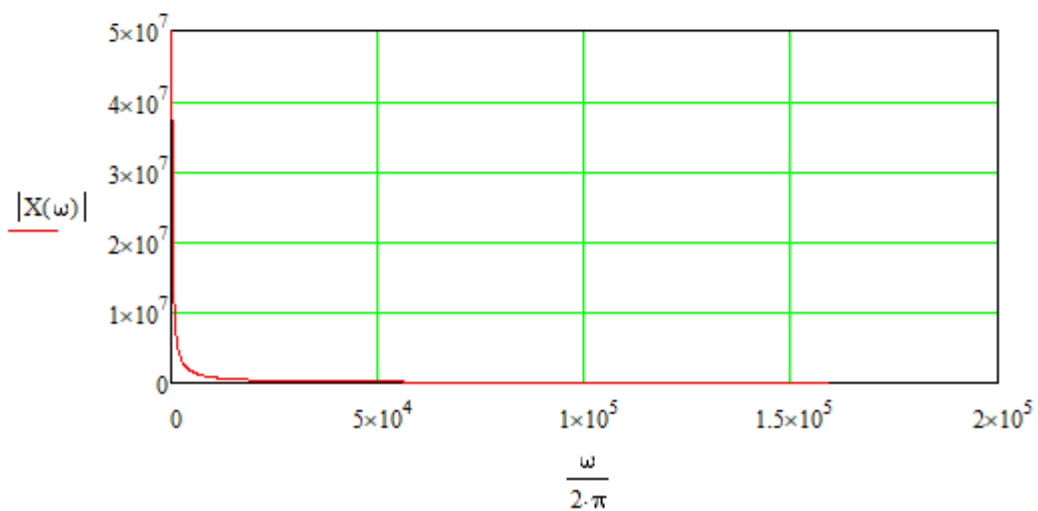


Рисунок 2.11 – Залежність характеристичного оору від частоти

Результати моделювання згасання фільтра і характеристичного опору в режимі differential mode (див. рис.2.7). При урахуванні паразитних індуктивностей і ємностей, фільтр можна розбити на дві ланки П-подібну і m-фільтр з коефіцієнтом $m=0.97434$

$$C1 = 4.7 \times 10^{-7} \text{ Ф} \quad L1 = 0.016 \text{ Гн}$$

Диференційний режим

$$R_{\text{eff}} := \sqrt{\frac{L1}{C1}} \quad R = 184.506 \quad \text{Ом}$$

$$f_{\text{sr}} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L1 \cdot C1}} \quad f_{\text{sr}} = 1.835 \times 10^3 \text{ Гц} \quad \omega_{\text{sr}} := 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{sr}} \\ \omega_{\text{sr}} = 1.153 \times 10^4 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Розрахуємо частотні характеристики

Ланка типу ФНЧ К

$$f := 0..10000 \quad \text{Гц}$$

$$Z_{\Pi}(f) := \frac{R}{\sqrt{1 - \frac{f^2}{f_{\text{sr}}^2}}} \quad f := 100,500..5000 \quad \text{Гц}$$

f =

100
500
900
$1.3 \cdot 10^3$
$1.7 \cdot 10^3$
$2.1 \cdot 10^3$
$2.5 \cdot 10^3$
$2.9 \cdot 10^3$
$3.3 \cdot 10^3$
$3.7 \cdot 10^3$
$4.1 \cdot 10^3$
$4.5 \cdot 10^3$
$4.9 \cdot 10^3$

$Z_{\Pi}(f) =$

	0
0	184.781
1	191.76
2	211.709
3	261.382
4	489.588
5	-331.795i
6	-199.482i
7	-150.813i
8	-123.472i
9	-105.402i
10	-92.363i
11	-82.417i
12	-74.533i

$f := 0..10000$

Гц

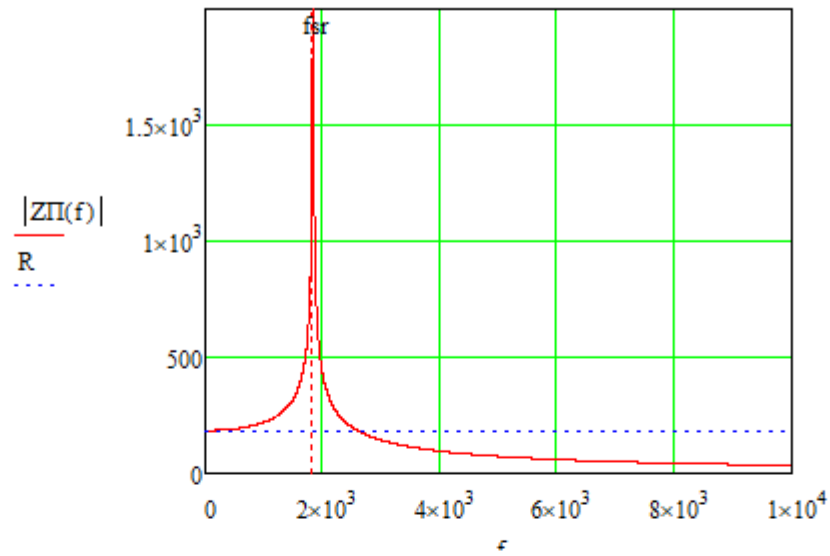


Рисунок 2.12 Залежність характеристичного опору від частоти для фільтрів Т та П-подібних типу К

 $f := fsr, 2000..5000$

Гц

$$a(f) := 2 \cdot \operatorname{acosh}\left(\frac{f}{fsr}\right)$$

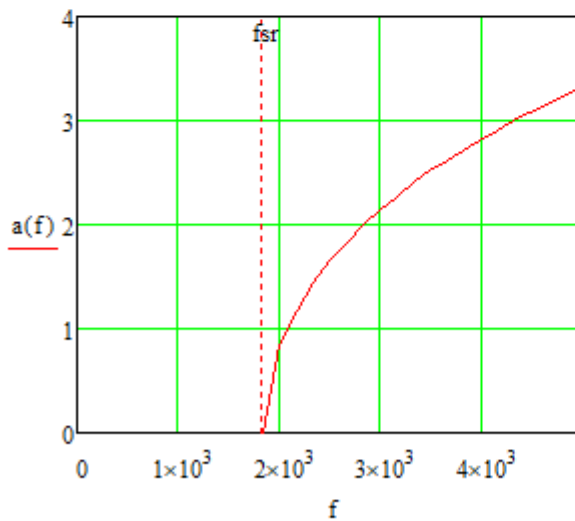


Рисунок 2.13 Залежність згасання від частоти фільтру типу К

$f =$	$a(f) =$
$1.835 \cdot 10^3$	0
$2 \cdot 10^3$	0.841
$2.165 \cdot 10^3$	1.181
$2.329 \cdot 10^3$	1.436
$2.494 \cdot 10^3$	1.648
$2.659 \cdot 10^3$	1.83
$2.823 \cdot 10^3$	1.992
$2.988 \cdot 10^3$	2.138
$3.153 \cdot 10^3$	2.272
$3.317 \cdot 10^3$	2.396
$3.482 \cdot 10^3$	2.511
$3.647 \cdot 10^3$	2.619
$3.812 \cdot 10^3$	2.72
$3.976 \cdot 10^3$	2.816
$4.141 \cdot 10^3$	2.907
...	...

$$m := 0.97434$$

Ланка типу m

$$f := f_{sr} .. 100000$$

Гц

$$am(f) := 2 \cdot \operatorname{acosh} \left[m \cdot \frac{\frac{f^2}{f_{sr}^2}}{\sqrt{1 - \frac{f^2}{f_{sr}^2} \cdot (1 - m^2)}} \right]$$

$$fb := \frac{f_{sr}}{\sqrt{1 - m^2}} \quad fb = 8.154 \times 10^3 \text{ Гц}$$

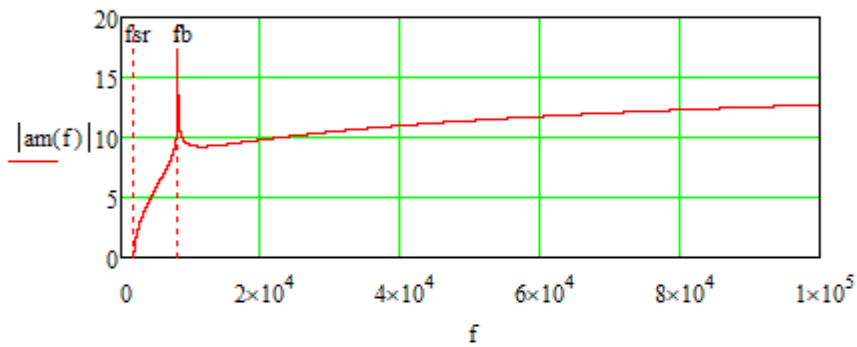


Рисунок 2.14 – Залежність згасання від частоти фільтру типу m

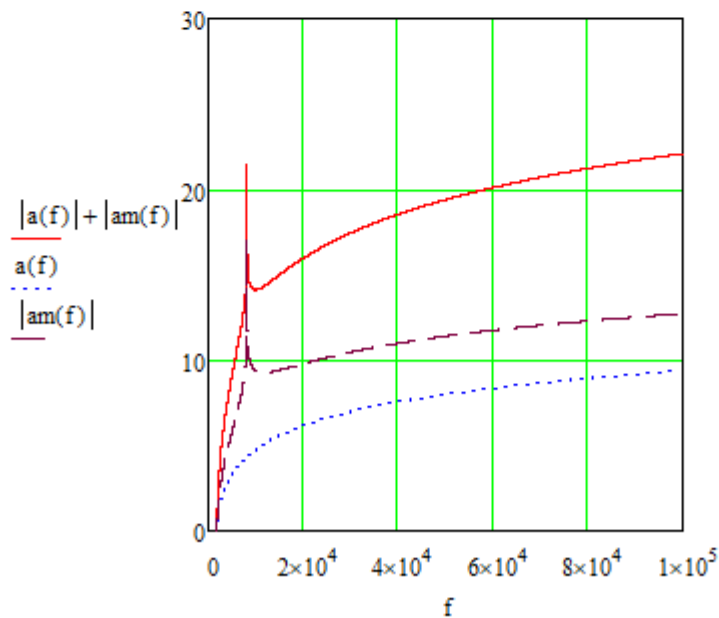


Рисунок 2.15 – Результуюче згасання від частоти багатоланкового фільтру

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРА НИЗЬКИХ ЧАСТОТ

Розвиток сучасних технологій призводить до появи великої кількості джерел провідних перешкод і впливає на належне функціонування залізничної автоматики та комунікаційного обладнання.

Особливо в промисловості, де використовуються перетворювачі частоти та інші комутаційні пристрої, існує потреба досліджувати електромагнітну сумісність фільтрів із навантаженням.

Режим живлення дуже поширений. Класичним методом запобігання негативного впливу ЕМП на обладнання, що захищається, є встановлення пасивного фільтра низьких частот. Цей метод дуже привабливий завдяки простоті застосування і відносно невисокій вартості. Однак для ефективної роботи фільтра необхідно звернути увагу на правильний монтаж, зокрема на надійне заземлення [1]. Як показано в [2], власне встановлення промислового обладнання дозволяє значно зменшити наслідки всіх можливих перешкод у системі.

Незважаючи на те, що в інструкції зі встановлення фільтра чітко зазначено необхідність хорошого заземлення фільтра, це не завжди досягається. Однією з можливих причин цього є те, що інженерна освіта зосереджена на проектуванні, ефективності та виборі фільтрів, а не на практичних аспектах встановлення фільтрів.

Наприклад, під час курсу електромагнітної сумісності студенти вивчають практику самостійного та взаємного (між компонентами) паразитних ефектів компонентів фільтра, як показано в демонстраціях, описаних у [3], а також вплив належного заземлення.

Однак у практичному застосуванні [4] студенти часто стикаються з наслідками поганого заземлення.

І ми часто спостерігаємо в реальних застосуваннях, що інженери в промисловості недостатньо усвідомлюють необхідність належного встановлення фільтра. Тому існує велика потреба в розробці демонстраційних матеріалів, щоб проілюструвати вплив установки на продуктивність фільтра. З цією метою правильна установка фільтрів описана в [5], але в цій статті розглядаються лише фільтри РСВ.

У статті наведено результати досліджень роботи мережевих фільтрів за такими режимами в залежності від якості заземлення, довжини заземлювального дроту, типу підкладки (пінополіетилен, хороший контакт між фільтром, корпус і коробка і погано тощо), якість монтажу, монтаж і режим роботи: загальний режим, диференційний режим [11-13]. Вимірювання проводили згідно [14-15]:

а) поганий контакт між корпусом мережевого фільтра та додатковою металевією коробкою, розділеною ізоляційним матеріалом (пінополіетиленом);

б) кращий контакт, досягнутий простим контактом між корпусами фільтрів і коробкою;

в) найкращий контакт, який фізично з'єднує корпус фільтра (за допомогою гвинта або припою) з металевим корпусом;

г) мережевий фільтр ізолюваний пінополіетиленом від металевого корпуса, заземлення здійснюється через довгий провід;

д) мережевий фільтр, ізолюваний пінополіетиленом з металевією коробкою, заземлення виконано коротким проводом;

е) розділення входу та виходу мережевого фільтра металевією перегородкою, яка також забезпечує хороший контакт між корпусом мережевого фільтра та металевим корпусом;

ж) використовуючи попередні умови, встановіть два додаткових конденсатори на виході між корпусом лінійного фільтра електромагнітних перешкод і коробкою на проводах лінії [13-15, 24].

На рис. 3.1. наведена схема мережевого фільтра, яка була використана для експериментального дослідження високочастотних ЕМП в діапазоні до 30 ГГц.

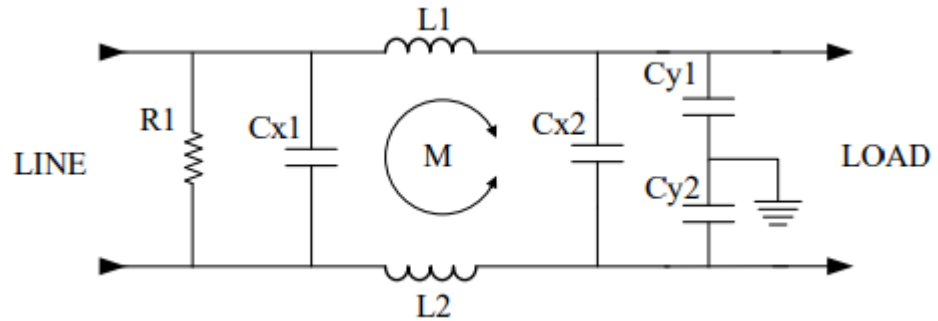


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення ФНЧ

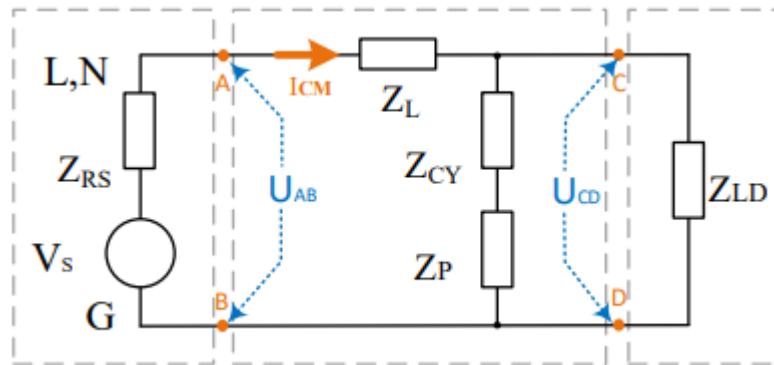


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема мережевого фільтра 50 Гц в режимі common mode (загальний режим)

Результати вимірювань залежності загасання від частоти в режимі роботи мережевого фільтра common mode (CM) наведені на рис. 3.3 [13-15].

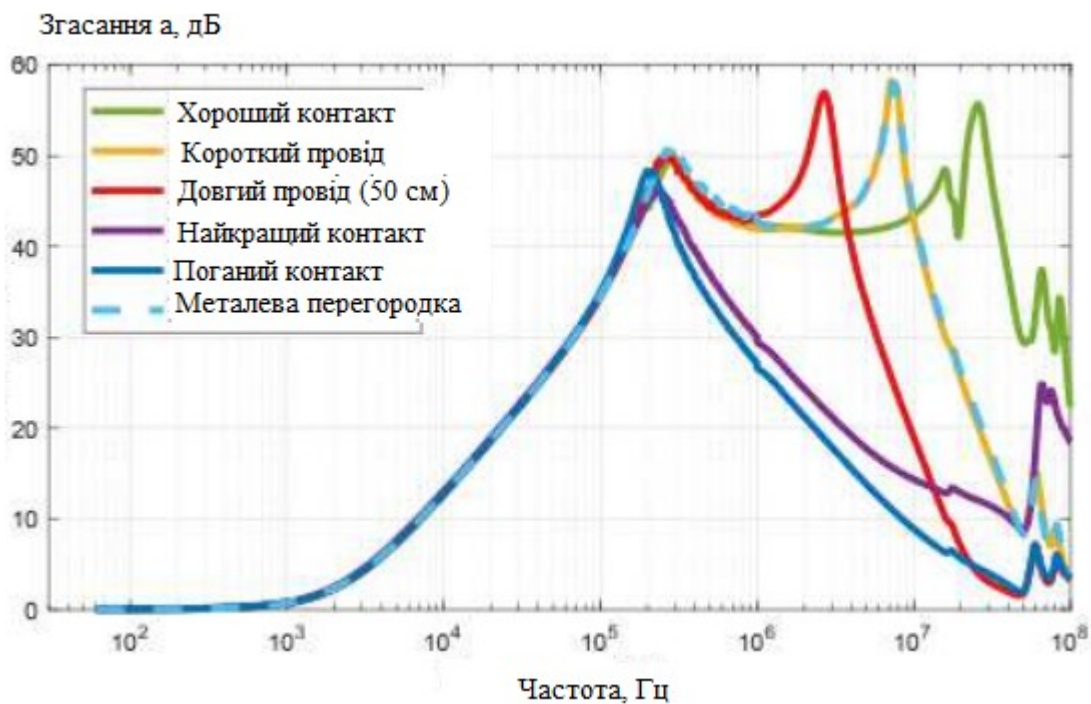


Рисунок 3.3 – Результати вимірювань залежності загасання від частоти в загальному режимі мережевого фільтра

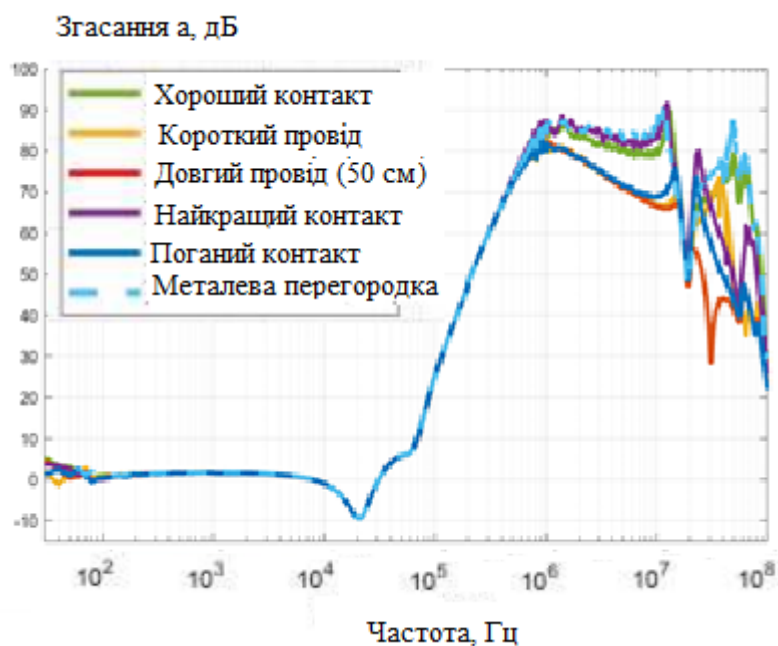


Рисунок 3.4 – Результати вимірювань залежності загасання від частоти в диференційному режимі мережевого фільтра

Зібрані схеми були випробувані у всіх запропонованих режимах заземлення. Вимірювання виконувались в режимах: нормальний (NM), загальний (CM) та диференційний (DM) проводили згідно з процедурою тестування, описаною в [13, 24], використовуючи комплект генератора стеження [7] та аналізатор сигналу [10]. Блок-схема тестової демонстрації показана на рис. 3.2. На результати DM не впливає суттєво якість заземлення, а якість установки в цілому, тому вони також були виміряні.

Під час вимірювань металевий ящик необхідно щільно закривати кришкою. Режим заземлення Загальний режим Надійне заземлення забезпечує найкраще ослаблення до 55 дБ у діапазоні високих частот від 10 МГц до 30 ГГц. Однак на частоті 25 МГц погіршення якості землі призводить до значного зниження значення згасання. Наприклад, різниця в ослабленні між різними типами заземлення становить більше 50 дБ на частоті близько 20 МГц. Якість установки включає заземлення та являє собою різні зв'язки між корпусом фільтра та опорною металевою коробкою, включаючи їх взаємне вирівнювання.

Відповідно до схеми фільтра конденсатори C_{Y1} і C_{Y2} підключені до металевому корпусу фільтра. Тому вважається, що запропоновані режими заземлення можуть бути представлені паралельним контуром еквівалентного опору, ємності та індуктивності, з'єднаним між землею фільтра та точкою з'єднання конденсатора.

Для оцінки параметрів, які можуть характеризувати кожен із режимів заземлення, були проведені вимірювання за допомогою вимірювача LCR. Результати цих вимірювань представлені в таблиці 3.1.

Наприклад, в режимі VD, паралельні поверхні металу (корпус фільтра і металева коробка) ізолювані один від одного і можуть бути представлені у вигляді паразитної ємності 20 пФ. Простий дотик до цих поверхонь у режимі хорошого контакту призводить до значень паразитної ємності до 200 пФ.

Коли фільтр заземлений через довгий дріт у режимі довгого дроту, його індуктивність 30...35 нГн додається паралельно до паразитної ємності. При використанні короткого дроту відбувається та ж ситуація, але рівень паразитної індуктивності падає до 5 нГн.

Нарешті, хороший режим заземлення з хорошим контактом забезпечує гвинтове або зварне з'єднання з металевим корпусом і не містить паразитних компонентів.

Один з фільтрів був розібраний і всі його компоненти перевірені за допомогою аналізатора опору.

Таблиця 3.1 – Значення паразитних індуктивностей і ємностей в різних режимах роботи фільтра і різної якості заземлення

Елемент	Поганий контакт	Довгий кабель заземлення (50 см)	Короткий кабель заземлення (10 см)	Найкращий контакт	Хороший контакт/ сепарація металу
L	-	25 нГн	5 нГн	-	-
C	20 пФ	20 пФ	20 пФ	200 пФ	-

Згідно з моделюванням, яке було виконано в MathCad для перевірки експериментальних досліджень фільтра, отримана в розділі 2 математична модель збігається в межах інженерної точності із результатами вимірювань. Це моделювання можна застосувати у зворотному порядку для студентів: спочатку вони повинні розробити фільтр із заданими (ідеальними) компонентами, потім вони повинні змоделювати його параметри, а потім виміряти їх. Тому необхідно враховувати неідеальну поведінку компонентів фільтра, таких як еквівалентний послідовний опір (ESR), еквівалентна послідовна індуктивність (L), еквівалентний паралельний опір (R) і еквівалентна паралельна ємність (C).

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ФІЛЬТРІВ

4.1 Види електромагнітних завад

Види електромагнітних перешкод від вторинних джерел імпульсного електроживлення. Низькочастотні ЕМП в електричних мережах найчастіше викликані роботою електромеханічних пристроїв, наприклад електродвигунів. Імпульсні джерела вторинного електроживлення (ІВЕП) створюють високочастотні ЕМП.

Радіочастотні ЕМП мають велику проникаючу здатність. Відтворювальні пристрої, в тому числі комп'ютери, найбільш чутливі до електромагнітних перешкод. Розробник електронних пристроїв повинен враховувати можливість виникнення перешкод як в електромережі, так і в навколишньому просторі, що викликає необхідність захисту своїх електронних схем від їх впливу. Крім того, самі пристрої, що розробляються, не повинні генерувати ЕМП.

Електромагнітні перешкоди поширюються як уздовж ліній (кондуктивні перешкоди), так і в навколишньому просторі (випромінювані просторові перешкоди). Лінійні перешкоди можна розділити на два компоненти: синфазні і диференціальні. Синфазна перешкода проходить через лінії електропередач і з'єднується із землею. Вимірюється між двома проводами лінії. Диференціальні перешкоди вимірюються між одним із проводів і землею. Класифікація ЕМП, викликаних роботою мережевих фільтрів представлена на рис. 4.1.

4.2 Нормування допустимих рівнів електромагнітних перешкод

Виробники електронного обладнання, призначеного для продажу на ринку Європейського Союзу, повинні відповідати стандарту електромагнітної сумісності EN55022.

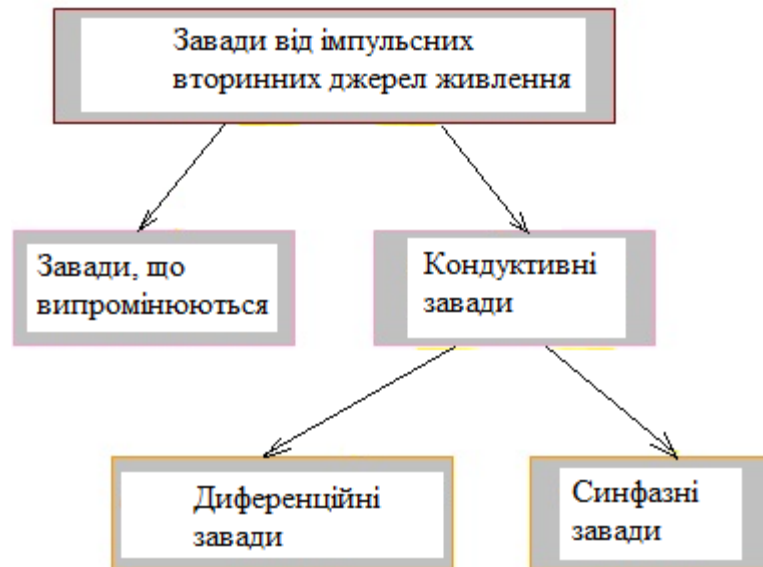


Рисунок 4.1 – Види високочастотних електромагнітних завад

Стандарт було введено з поправками 1 жовтня 2009 року. Усе електронне обладнання, що надходить на ринок ЄС, має пройти перевірку на відповідність стандарту EN55022.

При проходженні процедури відповідності на право нанесення маркування CE на кожен електронний виріб необхідні дослідження несприйнятливості та електромагнітного випромінювання, які регулюють стандарти - стандарти випромінювання регулюються стандартом EN55022, а несприйнятливість - стандартом EN55024.

Стандарт FCC (Федеральна комісія зі зв'язку), розділ 15, підрозділ J, застосовується до ринку електронного обладнання США.

Довгий час вимоги німецького стандарту VDE0871 щодо ступеня кондуктивного впливу на електричну мережу були найвищими. Для відповідності вимогам Європейського Союзу в Німеччині прийнято національний стандарт VDE0878, який відповідає EN55022.

Допустимі значення спектра провідних перешкод в електромережі для пристроїв класів А і Б в діапазоні частот від 10 кГц до 30 МГц згідно стандартів EN55022, VDE0871 і FCC наведені на рис. 1. 2.2.

Міжнародний стандарт EN 55022:2010 поширюється на будь-яке електричне обладнання або пристрій, що працює з номінальною напругою живлення не вище 600 В і основною функцією якого є запис, зберігання, відображення, отримання, передача, обробка, комутація або керування даними тощо. Обладнання які можна використовувати в поєднанні з одним або декількома портовими терміналами і основною функцією яких є передача інформації. EN 55022:2010 не застосовується до обладнання чи пристроїв, основною функцією яких є передача або прийом радіосигналів.

Допустимі значення спектра провідних перешкод в електромережі для пристроїв класів А і В в діапазоні частот від 10 кГц до 30 МГц згідно стандарту EN55022 поширюються на два типи радіоелектронних пристроїв:

- Промислове обладнання – (Клас А) – можна використовувати лише в промислових або інших спеціальних зонах;
- Побутова техніка – (Клас Б) – може використовуватися в житлових, офісних та інших подібних приміщеннях.

Стандарт EN55022 не регламентує рівень перешкод в діапазоні частот до 150 кГц.

Для діапазону частот 150 кГц – 30 МГц для пристроїв класу А відповідають стандарти EN55022 і VDE0871.

Стандарт FCC обмежує рівні ЕМП до нижчого значення на частотах від 450 кГц до 30 МГц.

На відміну від двох інших стандартів, стандарт VDE0871 обмежує поширення перешкод навіть у діапазоні частот від 10 кГц до 150 кГц.

Порівнювати межі випромінюваних значень ЕМП для різних стандартів досить складно, оскільки стандарти EN55022, VDE0871 і FCC встановлені для різних відстаней від точки вимірювання до джерела випромінювання.

Зазвичай в ПВП малої та середньої потужності (до 300 Вт або працюють зі струмами до 10 А) в складі обладнання проблему дотримання норм випромінювання ЕМП вирішують екрануванням. Блок живлення міститься в

металевому корпусі в металевому або металевому корпусі пристрою, що живиться.

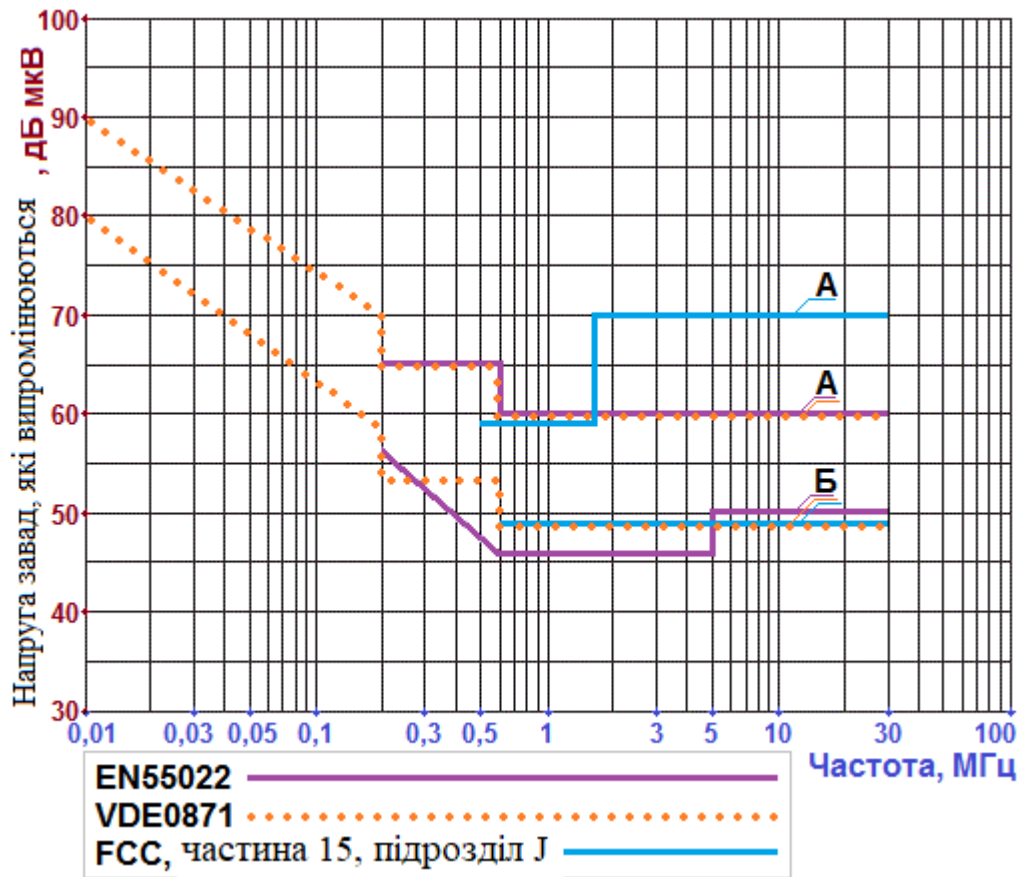


Рисунок 4.2 – Допустимі рівні ЕМП в електромережі для пристроїв класу А і В в діапазоні від 10 кГц до 30 МГц

4.3 Пригнічення електромагнітних перешкод

Найважливіші методи зменшення електромагнітних перешкод:

- використання екранів як корпусів для електронних пристроїв;
- екранування окремих вузлів пристрою;
- правильна конструкція електронних схем для зменшення паразитних параметрів;
- використання фільтрів придушення ЕМП.

Трансформатор покритий захисним екраном з металевої фольги, металевий корпус пристрою служить екраном від електромагнітних перешкод. Екран запобігає поширенню випромінюваних електромагнітів.

Корпус приладу повинен забезпечувати електромагнітне екранування шумів, що виходять від окремих вузлів, і запобігати потраплянню в пристрій ЕМП з навколишнього простору.

У будівництві житла слід використовувати магнітні матеріали на основі заліза. Для пластикових корпусів існують різні фарби, які можна використовувати для захисту корпусу від електромагнітних перешкод.

Завдяки екрануванню окремих вузлів пристрою можна зменшити ЕМП, що виходять від окремих вузлів.

Прикладом може бути трансформатор або дросель із серцевиною з повітряним зазором. Таке розташування обмоток створює сильне електромагнітне поле, яке діє на сусідні компоненти перетворювача. Вирішити проблему можна за допомогою екрану з мідної фольги. Подібний екран можна використовувати в силовому трансформаторі перетворювача. Екран підключається до загальної точки з боку первинної або вторинної обмотки.

У джерелах імпульсів із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) є кілька основних джерел електромагнітних перешкод. Основним джерелом шуму є вхідний ланцюг. Він містить високочастотний ключ, первинну обмотку трансформатора і конденсатор вхідного фільтра. Конденсатор вхідного фільтра забезпечує трапецієподібні імпульси струму, необхідні джерелу живлення. Іншим джерелом шуму є сліди на друкованій платі, де розташовані компоненти перетворювача. Сліди повинні бути максимально короткими і широкими. Широкі доріжки мають меншу індуктивність, ніж тонкі. Довжина слідів визначає частоти ЕМП, що випромінюються в навколишній простір. Щоб зменшити довжину з'єднань, конденсатор вхідного фільтра і вимикач слід розмістити поруч з трансформатором. Крім

того, використовувані конденсатори повинні мати невеликі значення еквівалентного послідовного опору та еквівалентної послідовної індуктивності. Чим більше значення цих паразитних параметрів, тим більше лінійних збурень на вході джерела живлення (рис. 4.3, 4.4).

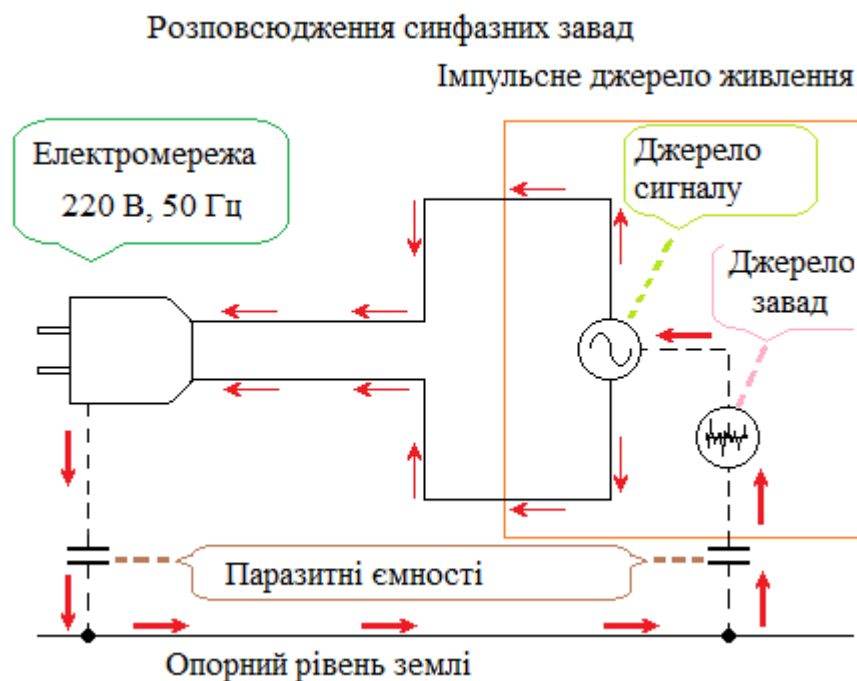


Рисунок 4.3 – Синфазні електромагнітні перешкоди

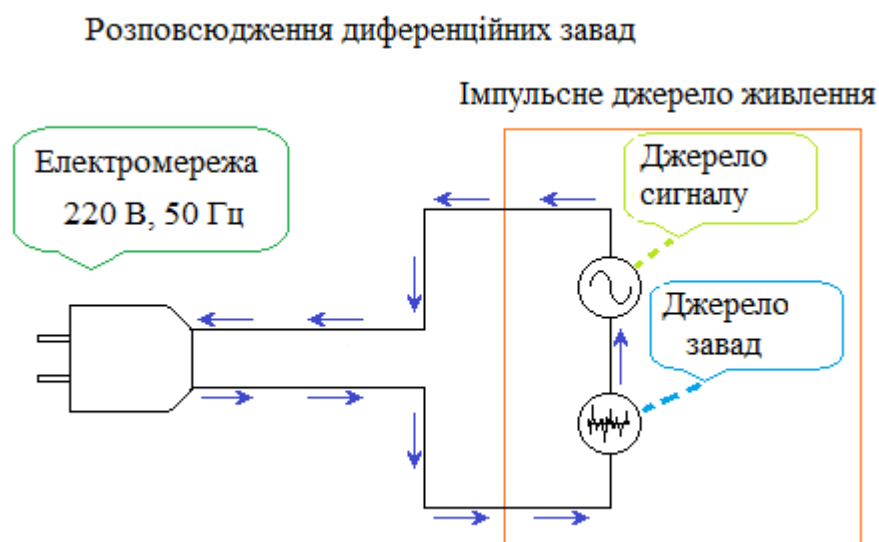


Рисунок 4.4 – Диференційні електромагнітні перешкоди

Напрями синфазних і диференціальних струмів ЕМП наведені на рис. 4.3, 4.4. Вторинні джерела живлення електронного обладнання є перетворювачами електричної енергії і повинні забезпечувати параметри, необхідні споживачу. Робота імпульсних джерел живлення повинна бути узгоджена з характеристиками електромережі і відповідати широкому спектру вимог, у тому числі пов'язаних зі зміною режимів роботи як мережі, так і навантаження.

Імпульсні джерела вторинної енергії є джерелами сильних ЕМП, оскільки сигнали від імпульсних джерел являють собою періодичну послідовність імпульсів. Спектри таких сигналів охоплюють діапазон частот до кількох мегагерц. Крім того, самі ІВП дуже сприйнятливі до впливу зовнішніх радіочастотних перешкод. У зв'язку з цим необхідно захистити імпульсні перетворювачі від зовнішніх лінійних перешкод, що проникають через мережевий кабель, і придушити ЕМП, створювані пристроєм і введені в електромережу.

Синфазний струм тече в одному напрямку по всіх лініях (рис. 4.3). Синфазні ЕМП також називають асиметричними. Синфазний сигнал ЕМП вимірюється між корпусом пристрою (землею) та будь-яким з'єднувальним провідником (включаючи шину живлення) пристрою.

Диференціальний струм перешкод (диференційний режим - «по лінії») (рис. 4.4), прикладений до обох проводів ЛЕП, тече по ньому в протилежних напрямках. Я також називаю диференціальну інтерференцію симетричною. Сигнал диференціальної ЕМП вимірюється між двома сполучними провідниками, сигнальним провідником і спільним полюсом, або між двома рейками живлення.

ВИСНОВКИ

Розробники електронних пристроїв повинні відповідати стандартам, які встановлюють прийнятні рівні промислових перешкод. Цей фактор вимагає застосування спеціальних фільтрів для придушення високочастотних електромагнітних перешкод. Такі фільтри називаються мережевими. Вони встановлюються між зовнішньою мережею та IVER. У вхідний і вихідний кола перетворювача вбудовані фільтри радіоперешкод. Такий фільтр повинен пригнічувати як диференціальну, так і синфазну складову ЕРС.

Досліджено вплив паразитних індуктивностей і ємностей мережевих фільтрів 50 Гц. Встановлено, що резонансні і резонансні частоти, спектр сигналу суттєво залежать від якості заземлення, довжини заземлюючого проводу, частоти на якій проводяться дослідження.

Розроблена математичні моделі роботи мережевого фільтра в режимах COMMON MODE, DIFFERENTIAL MODE з урахуванням паразитних індуктивностей та ємностей. В режимі COMMON MODE схема заміщення зводиться до трьох- або чотирьохелементного двополюсника в залежності від якості заземлення, а режимі DIFFERENTIAL MODE до двох ланок П-подібного фільтру типу К і m.

Теоретичні і експериментальні дослідження співпали з інженерною точністю.

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. Ботнарєвська, 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, Indonesia, 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>

17. C. F. Post, "EMC Protection of Instrument Signal Lines in Industrial Installations a Demonstration Model for EMC Education," 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), Amsterdam, Netherlands, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCEurope.2018.8485061.

18. F. Leferink, "Educating electromagnetic effects using printed circuit board demos," in Kyoto EMC Conference, Japan, 2009.
19. 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.
20. CISPR 17, "Methods of measurement of the suppression characteristics of passive EMC filtering devices," 2nd Ed., June 2011.
21. 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
22. V.Tarateeraseth, (2012). EMI filter design: Part III: Selection of filter topology for optimal performance. *Electromagnetic Compatibility Magazine*, IEEE. 1. 60-73. 10.1109/MEMC.2012.6244975.
23. D. Nemashkalo, P. Koch, N. Moonen, and F. Leferink, "Multichannel EMI filter performance assessment," in 2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility–EMC Europe, 2022, pp. 69-73.
24. Rodica Botnarevscaia; Ivan Struzhko; Ben Puylaert; Tetiana Serdiuk; Frank Leferink. Educational Demo's for Showing the Influence of (im)proper Installation and Grounding of Filters. 2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe. Publisher: IEEE. 04-08 September, Krakow, Poland. 2023 DOI: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274294
25. Куліков Д. Дослідження впливу паразитних індуктивностей та ємностей мережевих фільтрів низьких частот: дипл.р. спец. 273 – Залізничний транспорт / наук. керівник Т.М. Сердюк. Український державний університет науки і технологій. Дніпро, 2023. 49 с.